www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 23, 1961, no. 3 blz. 69-104 Verschenen 20 juni 1961

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

SCHAKELINGEN VOOR VERSCHILVERSTERKERS, I.

door G. KLEIN *) en J. J. ZAALBERG van ZELST *).

621.375:621.317.725.083.6

In aansluiting op een eerder verschenen artikel, waarin enige algemene beschouwingen over verschilversterkers werden gegeven, wordt in deel I van het nu volgende artikel een aantal schakelingen beschreven waarmede de vaak gevraagde zeer grote rejectiefactoren kunnen worden verkregen. In deel II, dat in het volgende nummer wordt afgedrukt, zullen enkele aanwijzingen worden gegeven voor het doelmatig gebruik van verschilversterkers. Verder worden nog enkele gevallen beschreven waarin men verschilversterkers met voordeel kan toepassen ook als de opgave niet bestaat uit het versterken van een spanningsverschil van twee punten.

Inleiding

De eigenschappen van een verschilversterker worden in hoge mate bepaald door die van de eerste trap. Dit is uiteengezet in een eerder verschenen artikel [1]). Als we thans enkele schakelingen gaan behandelen die voor verschilversterkers worden toegepast, zullen wij ons dan ook in hoofdzaak bezighouden met eentrapsversterkers. De problemen die ontstaan bij het vergroten van het aantal trappen, van welke problemen ook enkele hier ter sprake zullen komen, zijn meestal niet moeilijk op te lossen.

Zoals uit de eerder genoemde toepassingen blijkt [1]), worden verschilversterkers in hoofdzaak gebruikt voor signalen met een lage frequentie ofwel voor gelijkspanningen. Om deze reden beperken wij ons in dit artikel tot dergelijke versterkers en sluiten wij problemen die bij hoge frequenties ontstaan, b.v. door de capaciteiten van buizen en andere onderdelen, van onze beschouwingen uit.

De aard van de toepassingen van verschilversterkers brengt mede dat men voor de belangrijkste karakteristieke grootheden, de rejectiefactor en de discriminatiefactor, een, van geval tot geval verschillende, onderste grens dient voor te schrijven. *De schakelingen die wij zullen behandelen, zijn ontwikkeld om deze minimumwaarden zonder bijstellen van de versterker te kunnen garanderen, ook als de parameters van de buizen en andere onderdelen, die altijd spreiding vertonen, de maximale afwijking van de nominale waarde hebben en als deze afwijkingen alle in dezelfde (ongunstige) richting werken.*

Het probleem van de verschilversterker, dat in [1]) uitvoerig is behandeld, bestaat daarin dat de spanning tussen twee punten moet worden versterkt terwijl op beide punten een eventueel veel grotere spanning ten opzichte van aarde staat. Een voor de hand liggende methode om het spanningsverschil van de twee punten te versterken, zou zijn, de beide punten respectievelijk te verbinden met de ingangsklem en de „aardklem" van een normale enkelzijdige versterker. Deze laatste klem wordt dus dan niet met aarde verbonden; men kan zeggen dat de gehele versterker elektrisch „zweeft". Zonder in details te treden, kunnen we vaststellen dat dit „zwevend" uitvoeren van een versterker, die meestal bovendien nog moet worden afgeschermd tegen storende inductiespanningen, in de regel tot gecompliceerde en onhandige constructies leidt. Het in dit artikel beschreven principe, de balansversterker met een zeer grote gemeenschappelijke katodeweerstand, biedt in vrijwel alle gevallen een veel eenvoudiger oplossing.

Schakeling met gemeenschappelijke katodeweerstand

Wij hebben in het aangehaalde artikel [1]) gezien dat een balansversterker die uit twee onafhankelijk van elkaar werkende gedeelten bestaat, als verschil-

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

[1]) G. Klein en J. J. Zaalberg van Zelst, Algemene beschouwingen over verschilversterkers, Philips techn. T. **22**, 366-373, 1960 (no. 11).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

versterker onbruikbaar is, omdat in dit geval de discriminatiefactor 1 is, terwijl een grootte van minimaal ongeveer 100 in de meeste gevallen gewenst is. Een in principe bruikbare schakeling krijgt men wanneer men de beide buizen van een balansversterker een gemeenschappelijke, niet ontkoppelde katodeweerstand geeft (zie *fig. 1*). Zoals hierna zal blijken, moet deze weerstand, R_k, veel groter

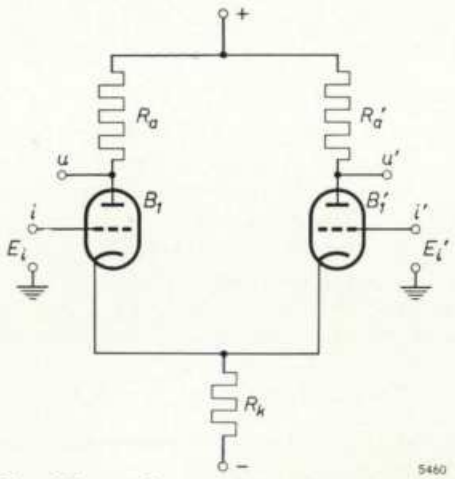


Fig. 1. Verschilversterker waarbij in de gemeenschappelijke katodeleiding van de beide buizen een weerstand R_k is opgenomen. Ingangsklemmen i en i', uitgangsklemmen u en u'.

zijn dan die welke voor het verkrijgen van de normale negatieve roosterspanning nodig is. In verband hiermede wordt R_k meestal niet met aarde verbonden maar met een spanningsbron die een negatieve spanning ten opzichte van aarde levert. Op deze wijze wordt verkregen dat bij de normale instelling van de buizen de roosters ongeveer aardpotentiaal kunnen hebben, wat speciaal bij gelijkspanningsversterkers de aansluiting op de punten met de te meten spanningen kan vereenvoudigen.

Zijn de beide buizen volkomen gelijk, en gelijk ingesteld, en brengt men in de beide roosterspanningen E_i en E_i' twee kleine [2]), gelijke, doch tegengesteld gerichte veranderingen aan, dan zal in de stroom door R_k geen wijziging optreden. Op de versterking van de beide buizen heeft R_k dan geen invloed. Hebben echter de veranderingen van E_i en E_i' hetzelfde teken, dan werken de beide buizen alsof zij parallel geschakeld waren. Door de aanwezigheid van R_k treedt nu tegenkoppeling op. Hierdoor is de versterking voor fazesignalen (zie [1])) kleiner dan die voor tegenfazesignalen; de discriminatiefactor F zal dus groter dan 1 zijn. De grootte van F is, als we volmaakte symmetrie onderstellen, gemakkelijk te berekenen. Volgens de bekende formule voor de versterking van een triode is immers de tegenfazeversterking:

$$A = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Hierin zijn μ en R_i respectievelijk de versterkingsfactor en de inwendige weerstand van de buizen, R_a is de anodeweerstand. Voor de fazeversterking C, waarbij tegenkoppeling door R_k optreedt, berekent men:

$$C = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a + 2(1+\mu)R_k}. \quad \ldots \quad (2)$$

De discriminatiefactor wordt dus:

$$F = \frac{A}{C} = 1 + 2\frac{(1+\mu)R_k}{R_i + R_a}. \quad \ldots \quad (3)$$

Bij de hierna te behandelen schakelingen is steeds R_i groot ten opzichte van R_a, en $2\mu R_k$ groot ten opzichte van R_i. Daar verder voor normale buizen de versterkingsfactor μ groot is ten opzichte van 1, kan men voor F met een zeer geringe fout schrijven:

$$F = 2SR_k, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

waarin S de steilheid van de beide buizen is. Hebben de buizen niet exact dezelfde steilheid, dan kan men dit in rekening brengen door in (4) voor S de gemiddelde waarde van de beide steilheden in te vullen. Niet te grote onderlinge verschillen in R_i en in R_a van beide buizen blijken op F een zo kleine invloed te hebben dat deze steeds kunnen worden verwaarloosd.

Om de rejectiefactor H te kunnen berekenen, moeten wij uitgaan van onderlinge verschillen in de parameters, die een zekere asymmetrie in de versterker veroorzaken. Immers, bij een volmaakt symmetrische versterker zou H oneindig groot zijn. Men dient dus voor een schakeling volgens fig. 1 de rejectiefactor te berekenen met de onderstelling dat voor de beide helften van de versterker zowel de steilheid en de versterkingsfactor van de buizen als de weerstanden in de anodeketens verschillend zijn. Het resultaat van deze berekening [3]) kan, indien de onderlinge verschillen niet te groot zijn, met goede benadering worden weergegeven door de formule:

$$H = \frac{4}{\left(\frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta R_a}{R_a}\right)\frac{1}{SR_k} + \frac{1}{\mu}\left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)\left(2 + \frac{R_a}{R_k}\right)}. \quad (5)$$

Hierin zijn ΔS, $\Delta\mu$ en ΔR_a de onderlinge verschillen

[2]) De veranderingen moeten zo klein zijn dat de kromming van de karakteristieken geen rol speelt.

[3]) Zie G. Klein, Rejection factor of difference amplifiers, Philips Res. Repts. **10**, 241-259, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in steilheid, versterkingsfactor en anodeweerstand van de buizen. Duidt men de desbetreffende grootheden van de ene buis zònder en die van de andere buis mèt een accent aan, dan is dus $\Delta S = S' - S$, $\Delta\mu = \mu' - \mu$ en $\Delta R_a = R_a' - R_a$.

Uit formule (5) blijkt dat de kleinste waarde van H optreedt wanneer $\Delta S/S$, $\Delta\mu/\mu$ en $\Delta R_a/R_a$ hetzelfde teken hebben (d.w.z. dat van één der buizen S, μ en R_a groter zijn dan de overeenkomstige grootheden van de andere buis), en bovendien de grootste waarden hebben die uit de normale toleranties van buizen en weerstanden zijn te verwachten. De formule wordt zeer overzichtelijk als wij voor de maximale relatieve verschillen van de drie genoemde grootheden een zelfde waarde aannemen, die wij met δ zullen aangeven. (In de praktijk kan δ b.v. 0,1 zijn.) Door invoering hiervan in (5) vinden wij de kleinste waarde van de rejectiefactor die bij een gegeven grootte van δ kan voorkomen:

$$H_{min} = \frac{4}{\delta\left\{\frac{2}{SR_k} + \frac{1}{\mu}\left(2 + \frac{R_a}{R_k}\right)\right\}}. \quad . \quad (6)$$

Uit deze formule zien wij dat H_{min} groter is naarmate de weerstand R_k in de gemeenschappelijke katodeleiding groter is. Is R_k zo groot dat R_a/R_k kan worden verwaarloosd ten opzichte van 2, dan kan (6) nog worden vereenvoudigd tot:

$$H_{min} = \frac{2}{\delta\left(\frac{1}{SR_k} + \frac{1}{\mu}\right)}. \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Uit (6) en (7) blijkt dat het voor het verkrijgen van een grote waarde van H_{min} wel nodig, maar niet voldoende is dat R_k groot is. Indien SR_k van dezelfde orde van grootte is als μ, dient R_k zeer veel te worden vergroot om een betrekkelijk geringe vergroting van H_{min} te bereiken. Voor een bepaalde waarde van H_{min} moet zowel SR_k als μ een bepaalde minimale waarde hebben, die groter is naarmate H_{min} groter is. Is SR_k klein ten opzichte van μ, dan kan voor de minimale waarde van de rejectiefactor worden geschreven:

$$H_{min} = 2SR_k/\delta, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

of, $\delta = 0{,}1$ stellend:

$$H_{min} = 20SR_k. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Uit de formules (4) en (9) zien wij dat in dit geval F ongeveer gelijk is aan het tiende gedeele van H_{min}.

Het komt ook voor dat SR_k groot is ten opzichte van μ. In dit geval kan men H_{min} benaderen door de formule:

$$H_{min} = 2\mu/\delta, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

of, met $\delta = 0{,}1$:

$$H_{min} = 20\mu. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Wenst men b.v. een rejectiefactor 10 000 te kunnen garanderen, dan zal men, aannemend dat R_k voldoende groot is, buizen moeten gebruiken waarvan de versterkingsfactor op zijn minst 500 is. Is SR_k niet groot ten opzichte van μ, dan is een grotere waarde van de laatstgenoemde grootheid nodig. Men kan b.v. ook een waarde van H_{min} van 10 000 bereiken als zowel SR_k als μ gelijk is aan 1000. Is de steilheid S van de buizen 1 mA/V [4]), dan moet dus R_k gelijk zijn aan 1 MΩ.

In bepaalde gevallen waarin een nog grotere rejectiefactor wordt verlangd, is voor R_k een nog veel grotere waarde, b.v. 10 MΩ nodig. Het gebruik van een dusdanige weerstand van normale constructie in de gemeenschappelijke katodeleiding is vrijwel nooit aantrekkelijk, omdat de negatieve voedingsspanning dan abnormaal hoog zou moeten zijn. Een gelukkige omstandigheid is echter dat van het in de katodeleiding opgenomen element alleen verlangd wordt dat het quotiënt van spanningsverandering en hierdoor ontstane stroomverandering groot is; met andere woorden, de differentiaalweerstand moet groot zijn. De weerstand voor gelijkstroom (gelijkspanning gedeeld door gelijkstroom) mag zonder bezwaar veel kleiner zijn; in verband met het hierboven vermelde omtrent de benodigde voedingsspanning is dit zelfs gewenst.

In een der volgende paragrafen zullen wij schakelingen behandelen die inderdaad een zeer grote differentiaalweerstand paren aan een geringe gelijkstroomweerstand. Eerst gaan wij echter nader in op enkele problemen die ontstaan door de eis dat buizen met een grote versterkingsfactor moeten worden gebruikt.

Verschilversterkers met pentodes

De meeste pentodes hebben een veel grotere versterkingsfactor dan de gebruikelijke triodes. Als in een verschilversterker buizen met een grote versterkingsfactor moeten worden gebruikt, zullen daarom de gedachten allereerst uitgaan naar het gebruik van pentodes. In *fig. 2* is het schema van een verschilversterker met twee pentodes getekend.

---

[4]) De buizen worden gewoonlijk op een kleine waarde van de anodestroom, dus ook van de steilheid, ingesteld, omdat dan bij de gewenste waarde van R_k de benodigde negatieve voedingsspanning laag kan zijn. Bij het vergroten van de anodestroom (en overeenkomstig verkleinen van R_k) neemt de steilheid relatief minder toe, waardoor, ondanks de grotere waarde van S, het produkt SR_k niet groter is dan bij een kleinere waarde van S.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(In de gemeenschappelijke katodeleiding tekenen wij voorlopig nog een normale weerstand, R_k.)

De zeer grote versterkingsfactor van een pentode komt alleen dan ten volle tot zijn recht wanneer bij

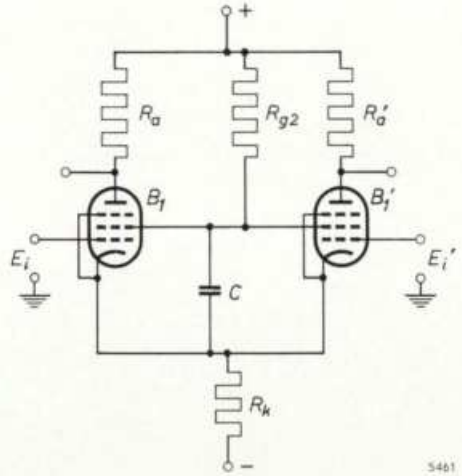


Fig. 2. Verschilversterker voor wisselspanningen met twee pentodes.

een veranderlijke stuurroosterspanning een constante spanning tussen het schermrooster en de katode wordt gehandhaafd en bovendien veranderingen van de schermroosterstroom niet geheel of gedeeltelijk door R_k lopen. Is de verschilversterker alleen voor wisselspanningen bedoeld, dan kan men om dit te bereiken op de algemeen gebruikelijke wijze een condensator C tussen de schermroosters en de katodes aanbrengen (zie fig. 2). Moet de versterker ook gelijkspanningen kunnen versterken, dan kan men in plaats van een condensator een spanningstabiliseerbuis gebruiken (zie *fig. 3*). Daar de brandspanning van een dergelijke buis slechts

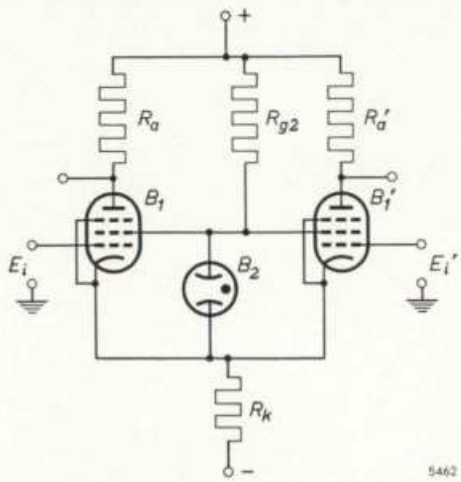


Fig. 3. Verschilversterker voor gelijkspanningen met twee pentodes. Tussen de schermroosters en de katodes is een spanningstabiliseerbuis B_2 geschakeld.

in geringe mate van de stroom afhangt, wordt ook op deze wijze een vrijwel constante spanning tussen de schermroosters en de katodes verkregen en lopen ook hierbij veranderingen van de schermroosterstroom nagenoeg niet door R_k.

Aan de beide bovengenoemde voorwaarden is nooit geheel voldaan en hierdoor is H_{min} kleiner dan uit vergelijking (7) zou volgen. In de noemer van de volledige vergelijking treden nl. ten opzichte van verg. (7) nog twee termen extra op, waarvan de eerste ontstaat door het feit dat de verhouding van de mate waarin de stuurroosterspanning en de schermroosterspanning de anodestroom beïnvloeden, niet bij beide buizen dezelfde behoeft te zijn. De tweede term wordt veroorzaakt door de mogelijke spreiding in de verdeling van de katodestroomveranderingen over anode en schermrooster.

Een ernstige moeilijkheid bij het gebruik van pentodes ontstaat door het feit dat naar het schermrooster een zekere gelijkstroom vloeit. Om de vereiste schermroosterspanning te kunnen verkrijgen, mag de weerstand R_{g2} een bepaalde waarde niet overschrijden. (In fig. 3 vloeit bovendien de stroom van de spanningstabiliseerbuis B_2 door R_{g2}. Deze weerstand moet daarom in dit geval nog kleiner zijn dan bij gebruik van een condensator.) Daar tussen de schermroosters en de katodes een constant spanningsverschil wordt gehandhaafd, evenals tussen de met + en — aangegeven punten, kan men voor spannings- en stroomveranderingen de weerstand R_{g2} als parallel met R_k geschakeld beschouwen. De differentiaalweerstand tussen de katode en aarde wordt hierdoor verkleind, en dit veroorzaakt, zoals wij hierboven hebben aangetoond, een kleinere waarde van de gegarandeerde rejectiefactor en van de discriminatiefactor. Middelen om dit bezwaar voor een belangrijk deel op te heffen, zullen wij in een der volgende paragrafen bespreken.

Het gebruik van cascodes

Een versterkertrap met een versterkingsfactor die veel groter is dan die van een triode, kan, behalve met een pentode, ook worden verkregen met twee triodes die zodanig zijn verbonden dat een zg. cascode ontstaat. In *fig. 4* is een principeschema van een dergelijke combinatie van twee buizen getekend. De katode van de triode B_2 is verbonden met de anode van B_1. Zijn de voedingsspanningen zo gekozen dat de buizen zich normaal instellen, dan vertoont een cascode eigenschappen die veel met die van een pentode overeenkomen. De rol van het rooster van de triode B_2 vertoont veel overeenkomst met die van het schermrooster van een pentode. Een belangrijk verschil is echter dat bij een pentode steeds schermroosterstroom vloeit, terwijl in de „bovenste" buis van een cascode niet

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

meer dan de bij normale buizen voorkomende, uiterst geringe, roosterstroom optreedt. Hieruit ontstaat een belangrijk voordeel van het gebruik van cascodes in verschilversterkers; wij komen hierop aanstonds nader terug.

Een eenvoudige berekening leert dat de steilheid van een cascode vrijwel gelijk is aan de steilheid van de „onderste" buis, dus

$$S_{casc} = S_1 . \quad . . . . . \quad (12)$$

De versterkingsfactor μ_{casc} van het geheel is gegeven door de formule:

$$\mu_{casc} = \mu_1 (\mu_2 + 1) , \quad . . . \quad (13)$$

waarin μ_1 en μ_2 resp. de versterkingsfactoren van de „onderste" en de „bovenste" buis zijn. Daar versterkingsfactoren van normale buizen altijd groot zijn ten opzichte van 1, kan voor (13) met zeer goede benadering worden geschreven:

$$\mu_{casc} = \mu_1 \mu_2 . \quad . . . . . \quad (14)$$

De versterkingsfactor van een cascode is dus groot, vergeleken met die van ieder van de beide buizen waaruit hij is samengesteld.

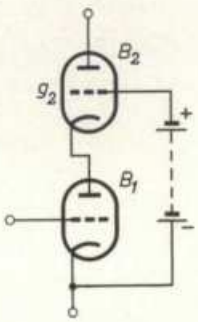


Fig. 4

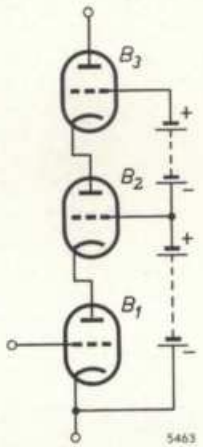


Fig. 5

Fig. 4. Cascode, bestaande uit twee triodes.
Fig. 5. Cascode, bestaande uit drie triodes.

Een eventueel gewenste nog grotere waarde van de versterkingsfactor kan men verkrijgen door het gebruik van een cascode met meer dan twee buizen. In *fig. 5* is als voorbeeld een schakeling met drie buizen getekend. De versterkingsfactor van de cascode is in dit geval:

$$\mu_{casc} = \mu_1 (\mu_2 + 1) (\mu_3 + 1) ,$$

of bij zeer goede benadering:

$$\mu_{casc} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 .$$

Om in een schakeling volgens fig. 4 de versterkingsfactor volgens (13) te verkrijgen, moet het rooster g_2 van B_2 een constante spanning hebben ten opzichte van de katode van B_1. In de figuur is hiertoe eenvoudigheidshalve een batterij getekend. Natuurlijk zal men meestal de spanning van g_2 willen verkrijgen uit de anodespanningsbron door middel van een spanningsdeler. In *fig. 6* is een

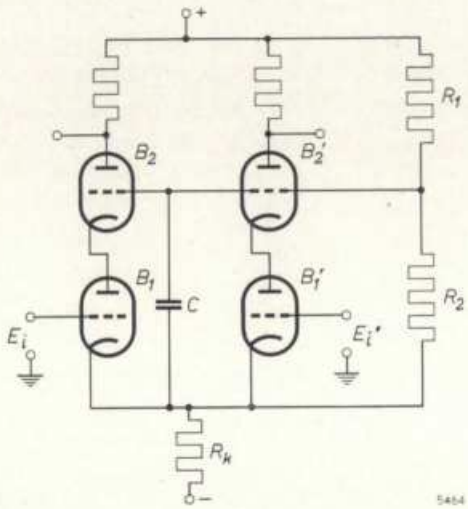


Fig. 6. Verschilversterker voor wisselspanningen met twee cascodes.

dergelijke spanningsdeler getekend in het schema van een verschilversterker die bestaat uit twee cascodes. Omdat in de buizen slechts een uiterst geringe roosterstroom vloeit, kan de weerstand R_1 zeer groot worden gemaakt (b.v. enkele megohms). Om de gewenste constante spanning tussen de roosters van B_2 en B_2' en de katodes van B_1 en B_1' te handhaven, is de condensator C aangebracht. Hierdoor worden voldoend snelle spanningsvariaties van de „onderste" katodes bijna volledig op de „bovenste" roosters overgebracht. Men kan dus hier voor wisselspanningen de weerstand R_1 als parallel met R_k geschakeld beschouwen, waardoor de differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding weer kleiner is dan R_k. In verband met het zo juist genoemde feit dat R_1 zeer groot kan worden gekozen, is dit bezwaar hier echter veel minder ernstig dan bij de schermroosters van pentodes.

Dit voordeel van cascodes ten opzichte van pentodes is in veel mindere mate aanwezig wanneer men de verschilversterker op dezelfde wijze als de pentodeschakeling van fig. 3 geschikt zou willen maken voor het versterken van gelijkspanningsverschillen. Men zal dan de condensator C vervangen door een spanningstabiliseerbuis, en omdat in deze buis een zekere gelijkstroom vloeit, moet voor R_1 een veel kleinere weerstand worden gebruikt. Evenals bij pentodes kunnen ook hier schakelingen worden gebruikt die dit bezwaar voor een belangrijk

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deel ondervangen. In een der volgende paragrafen gaan wij hierop nader in.

Het is nuttig op te merken dat de winst in H_{min} die door het gebruik van cascodes in plaats van pentodes wordt bereikt, kleiner is dan uit de formules (7) en (14) zou volgen. Dit komt doordat de maximale spreiding in de versterkingsfactor van een cascode groter is dan de spreiding die de versterkingsfactoren van ieder van de buizen afzonderlijk vertonen. Kunnen μ_1 en μ_2 ieder een relatieve afwijking δ van de nominale waarde hebben, dan is de maximale relatieve afwijking van μ_{case} gelijk aan 2δ. Om deze reden moet bij gebruik van cascodes voor de minimale waarde van H die kan worden gegarandeerd, in plaats van formule (7) de volgende formule worden gebruikt:

$$H_{min} = \frac{2}{\delta\left(\frac{1}{S_1 R_k} + \frac{2}{\mu_{case}}\right)} . \quad . \quad . \quad (15)$$

De term waarin de invloed van de versterkingsfactor op H_{min} tot uiting komt, wordt dus bij overgang van triodes op cascodes slechts verkleind met de helft van de verhouding van de versterkingsfactoren.

Analoog met wat bij pentodes werd vermeld, zij opgemerkt dat de formule (15) alleen geldig is wanneer aangenomen wordt dat tussen de roosters van de bovenste buizen en de katodes van de onderste buizen in het geheel geen spanningsvariaties optreden. Wenst men er rekening mee te houden dat dit nooit geheel het geval is, en neemt men hiertoe aan dat aan de roosters spanningsvariaties optreden die k maal de spanningsvariaties aan de katodes zijn ($k < 1$), dan dient de in (15) in te vullen waarde voor μ_{case} niet te worden berekend uit (13) of (14), doch uit:

$$\mu_{case} = \frac{\mu_1(\mu_2 + 1)}{(1 - k)\mu_2 + 1} .$$

Doordat in een cascode vrijwel geen roosterstroom vloeit, treedt hierbij geen verlaging van H_{min} op door een eventuele spreiding in de verdeling van de katodestroom, zoals dit bij pentodes het geval is.

Soms kan het als een nadeel van cascodes worden beschouwd dat het voedingsapparaat een hogere spanning moet leveren dan bij pentodes. Speciaal bij meertrapsversterkers voor gelijkspanning met directe koppeling tussen de trappen (zie hierover deel II van dit artikel) kan dit als een bezwaar worden gevoeld. Uiteraard wordt dit bezwaar nog groter wanneer cascodes worden gebruikt die uit meer dan twee buizen bestaan.

Schakelingen voor het verkrijgen van een grote differentiaalweerstand in de katodeleiding

Uit een in het bovenstaande gegeven getallenvoorbeeld volgde reeds dat het gebruik van een normale weerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen waarmee een verschilversterker is opgebouwd, zelden in aanmerking zal komen, doch dat men hier een element of een schakeling moet gebruiken waarvan de gelijkstroomweerstand klein en de differentiaalweerstand zeer groot is. Aan het gevraagde kan in hoge mate worden voldaan indien men in de katodeleiding een pentode opneemt (*fig. 7*). Worden het stuurrooster en het schermrooster ten opzichte van de katode

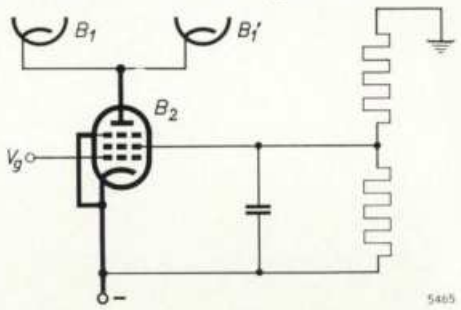


Fig. 7. Gebruik van een pentode B_2 voor het verkrijgen van een grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen B_1 en B_1'.

op de voorgeschreven constante spanningen gehouden, dan is de differentiaalweerstand van een pentode gelijk aan zijn inwendige weerstand; deze kan meer dan 1 MΩ bedragen.

Een andere manier om een grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding te verkrijgen, is in *fig. 8* geschetst. In de katodeleiding van de triode B_2 is een weerstand R_{k2} opgenomen. Wanneer het rooster van B_2 een constante spanning heeft, is de differentiaalweerstand R_d van de dik getekende tak gegeven door de formule:

$$R_d = R_{i2} + (1 + \mu_2) R_{k2} . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Hierin is R_{i2} de inwendige weerstand en μ_2 de versterkingsfactor van de triode B_2. Uit (16) zien wij dat R_d groter is dan $\mu_2 R_{k2}$. Wordt dus b.v. een triode gebruikt met een versterkingsfactor 50 en is R_{k2} gelijk aan 0,1 MΩ, dan is R_d groter dan 5 MΩ.

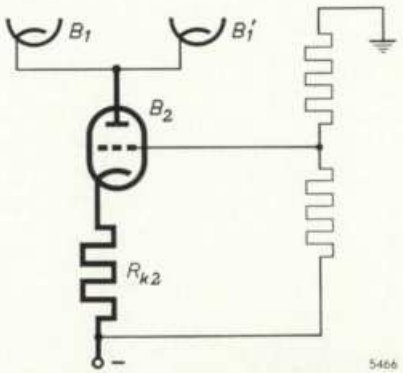


Fig. 8. Gebruik van een triode B_2 met katodeweerstand R_{k2} voor het verkrijgen van een grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen B_1 en B_1'.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Van een pentode is de versterkingsfactor veel groter dan van een triode en men zal dus een grotere waarde van R_d kunnen verkrijgen indien men in fig. 8 de triode B_2 door een pentode vervangt. Men dient hierbij echter wel te overwegen dat bij een pentode de formule (16) alleen dàn mag worden toegepast indien de veranderingen van de anodestroom gelijk zijn aan de veranderingen van de stroom door de weerstand in de katodeleiding. Doordat in een pentode altijd schermroosterstroom vloeit, is de genoemde voorwaarde alleen vervuld wanneer tussen het schermrooster en de katode een condensator met een voldoend grote capaciteit ofwel een gasontladingsbuis is aangebracht. In vele gevallen is het dan eenvoudiger om een cascode te gebruiken, waarin geen roosterstroom optreedt en de genoemde maatregel dus niet behoeft te worden genomen.

In *fig. 9* is in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen B_1 en B_1' een cascode getekend, die

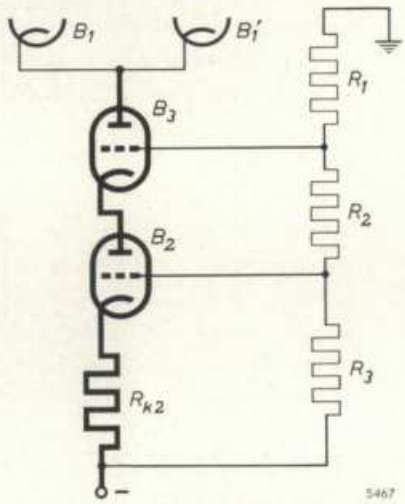


Fig. 9. Gebruik van een cascode met katodeweerstand R_{k2} voor het verkrijgen van een grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen B_1 en B_1'.

is samengesteld uit de buizen B_2 en B_3. In de katodeleiding van B_2 is de weerstand R_{k2} geschakeld, terwijl de spanningen op de roosters op constante waarden worden gehouden door de spanningsdeler R_1-R_2-R_3. Wij zagen in het voorgaande reeds dat de versterkingsfactor van een cascode groter is dan het produkt van de versterkingsfactoren van de beide buizen. Om deze reden is de differentiaalweerstand van de dik getekende tak groter dan $\mu_2\mu_3 R_{k2}$ (waarbij μ_2 en μ_3 de versterkingsfactoren van de triodes B_2 en B_3 zijn). Daar men ook hier de mogelijkheid heeft om cascodes met meer dan twee triodes te gebruiken, kan men op deze wijze vrijwel onbeperkt grote waarden van de differentiaalweerstand van de dik getekende tak verkrijgen.

Zoals wij in het voorgaande reeds hebben uiteengezet, bestaat de differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen B_1 en B_1' niet uitsluitend uit de in de figuren 7, 8 en 9 dik getekende tak, maar is parallel hiermede een weerstand geschakeld, die in de figuren 2 en 3 met R_{g2} en in fig. 6 met R_1 is aangeduid. Daar R_{g2} veel kleiner is dan de gewenste differentiaalweerstand (in gelijkspanningsversterkers geldt dit, zoals wij reeds zagen, ook voor R_1), vormt dit een sterke belemmering voor het verkrijgen van een grote rejectiefactor. Een tweetal schakelingen waarmede dit bezwaar voor een belangrijk deel kan worden opgeheven, zijn in de figuren 10 en 11 geschetst.

In *fig. 10* is het gewenste constante spanningsverschil tussen de katodes en de schermroosters van B_1 en B_1' niet verkregen door tussen deze elektrodes een condensator of een spanningstabiliseerbuis aan te brengen, doch door middel van een als katodevolger geschakelde buis B_3 en een koppelcondensator C. (Wanneer de verschilversterker ook gelijkspanningsverschillen moet kunnen versterken, dient de condensator C weer te worden vervangen door een spanningstabiliseerbuis.) Als de katodevolger ideaal was en de reactantie van de condensator C verwaarloosd kon worden ten opzichte van de weerstand R_{g2}, zou de spanning van de schermroosters de spanningsvariaties aan de katodes volledig „volgen". In werkelijkheid is dit natuurlijk nooit geheel het geval. Hiervoor zou nl. de differentiaalweerstand tussen de katode van B_3 en aarde oneindig groot moeten zijn en zou deze buis ook

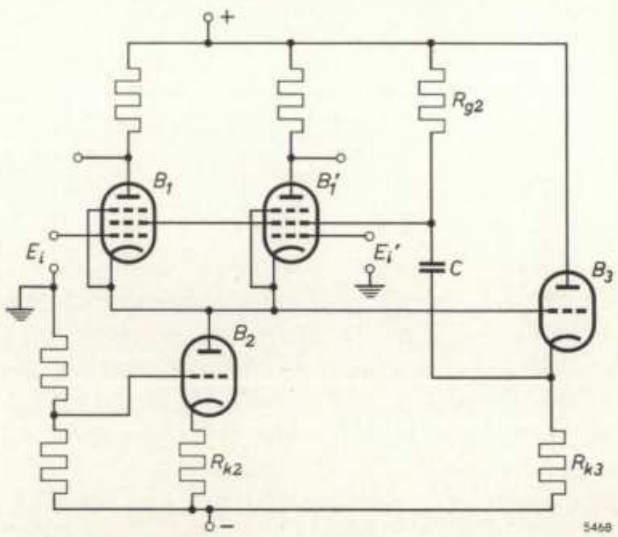


Fig. 10. Verschilversterker met de pentodes B_1 en B_1'. In de gemeenschappelijke katodeleiding wordt een grote differentiaalweerstand verkregen door middel van de triode B_2 en de weerstand R_{k2}. De katodevolger B_3 dient om de schermroosters de spanningsfluctuaties aan de katodes van B_1 en B_1' te doen volgen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een oneindig grote versterkingsfactor moeten hebben. Tussen de schermroosters en de katodes van B_1 en B_1' zullen dus kleine spanningsvariaties blijven bestaan, doch het feit dat in het schema van fig. 10 R_{g2} geen invloed uitoefent op de weerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van deze buizen, maakt tòch dat door het aanbrengen van de katodevolger B_3 een aanzienlijke verbetering in de rejectiefactor en de discriminatiefactor kan worden verkregen.

Nog beter wordt de zaak indien men de katodevolger B_3 in fig. 10 vervangt door een versterker waarvan de versterking de waarde 1 nog beter benadert. Op deze wijze kan de invloed van R_{g2} op de rejectiefactor en de discriminatiefactor vrijwel volledig worden geëlimineerd.

In het schema van *fig. 11* is tussen de katodes en schermroosters van de pentodes B_1 en B_1' weer een

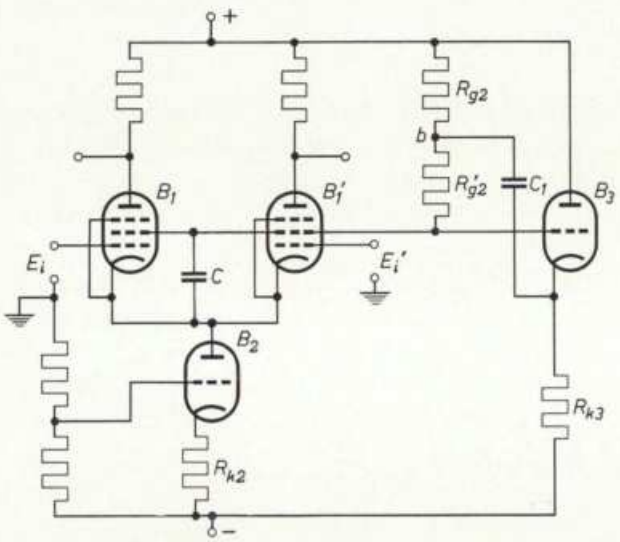


Fig. 11. Verschilversterker met de pentodes B_1 en B_1'. In de gemeenschappelijke katodeleiding wordt een grote differentiaalweerstand verkregen door middel van de triode B_2 en de weerstand R_{k2}. De als katodevolger geschakelde triode B_3 brengt de differentiaalweerstand tussen de schermroosters en de anodespanningsbron op een zeer hoge waarde.

condensator C getekend. Bij een voldoend grote waarde hiervan zal de spanning van de schermroosters de spanningsvariaties aan de katodes vrijwel volledig volgen. In dit opzicht heeft dus deze schakeling een voordeel ten opzichte van die van fig. 10. Het nadeel dat de voedingsweerstand van de schermroosters de differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding van B_1 en B_1' verkleint, is voor een groot deel opgeheven doordat de schermroosters hier met de anodespanningsbron zijn verbonden door middel van een schakeling die een zeer grote differentiaalweerstand, doch een veel kleinere gelijkstroomweerstand heeft. Deze schakeling bestaat uit de beide weerstanden R_{g2} en R_{g2}' en een katodevolger B_3, die de spanningsvariaties van de schermroosters via de condensator C_1 vrijwel volledig overbrengt naar het punt b. Hierdoor is de differentiaalweerstand tussen de schermroosters en de anodespanningsbron veel groter dan $R_{g2} + R_{g2}'$, wat een aanzienlijke vergroting van de rejectie- en discriminatiefactoren kan betekenen.

Ook in het schema van fig. 11 kan men in plaats van de katodevolger B_3 weer een versterker gebruiken waarvan de versterking de waarde 1 nog beter benadert. Ook kunnen schakelingen worden gebruikt waarin de principes van fig. 10 en 11 zijn gecombineerd. Een uitvoeriger behandeling hiervan valt buiten het bestek van dit artikel.

De in de figuren 10 en 11 geïllustreerde manieren om de differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding te vergroten, kunnen natuurlijk ook worden toegepast wanneer in de verschilversterker cascodes in paats van pentodes worden gebruikt. Zoals wij in het voorgaande reeds hebben uiteengezet, zal men er hier meestal alleen dàn behoefte aan hebben als de verschilversterker voor gelijkspanningen moet worden ingericht, zodat men in plaats van condensatoren spanningstabiliseerbuizen moet gebruiken en hierom de roosters van de „bovenste" buizen (zie fig. 6) via een betrekkelijk kleine weerstand met de anodespanningsbron zijn verbonden.

Enkele meetresultaten

Uit het bovenstaande zal het duidelijk geworden zijn dat men voor een verschilversterker waarbij zeer grote waarden van de rejectiefactor en van de discriminatiefactor gegarandeerd moeten kunnen worden, keuze kan maken uit een groot aantal schakelingen. Uit de vele mogelijkheden hebben wij drie voorbeelden gekozen om de hieraan gemeten waarden van de rejectiefactor te vergelijken met de voor deze schakelingen berekende minimale waarden.

In *fig. 12* is het schema weergegeven van een verschilversterker met twee pentodes van het type E 80 F. De gewenste grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding wordt verkregen met de triode B_2 en de weerstand R_{k2}. Door middel van de katodevolger B_3 worden de spanningsvariaties van de katodes van B_1 en B_1' overgebracht naar het met b aangeduide punt. De invloed van de schermroostervoedingsweerstand op de rejectiefactor wordt dus hier verminderd met een schakeling die een combinatie is van de in de figuren 10 en 11 geïllustreerde principes. Voor de buizen B_2 en B_3 worden de twee helften van de dubbeltriode ECC 81 gebruikt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De berekende minimale waarde van de rejectiefactor met $\delta = 0{,}1$ blijkt voor deze schakeling 20 000 te zijn. In *fig. 13* zijn op een logaritmische schaal zowel deze berekende minimale waarde als de waarden van de rejectiefactor aangegeven die met 25 willekeurige buizencombinaties zijn gemeten. De metingen zijn uitgevoerd bij een frequentie van 1 kHz. De laagste gemeten waarde is 24 000.

Fig. 14 geeft het schema weer van een verschilversterker met twee cascodes, die bestaan uit twee dubbeltriodes van het type E 80 CC. Van een dubbeltriode ECC 81 wordt de ene helft gebruikt voor B_3 en de andere helft als katodevolger, B_4, om de spanningsvariaties van de katodes van B_1 en B_1' over te brengen naar de roosters van B_2 en B_2'. Deze overbrenging vindt plaats via de spanning-

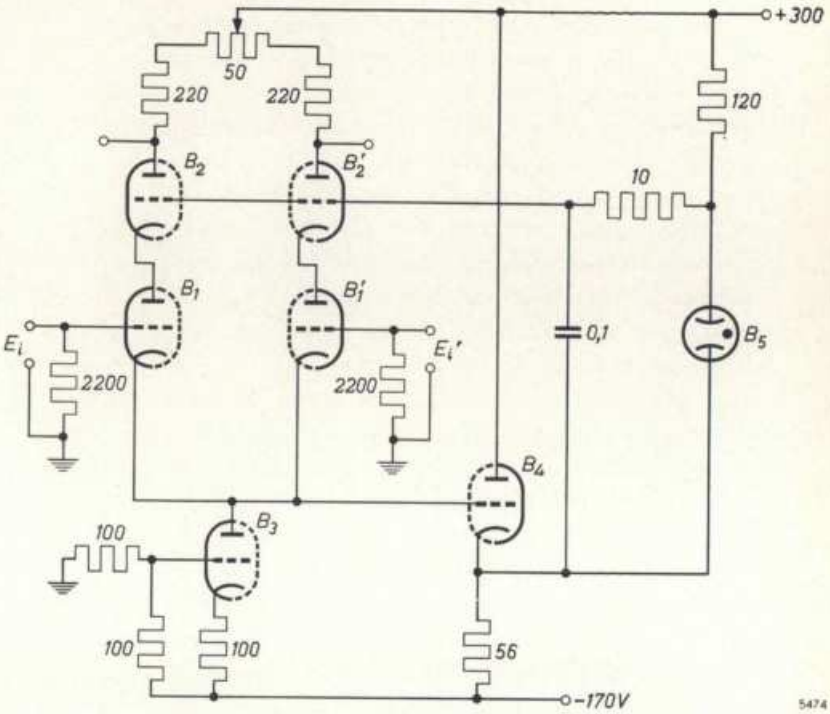


Fig. 14. Verschilversterker voor gelijkspanningen, met twee cascodes die zijn samengesteld uit twee dubbeltriodes E 80 CC. De triodes B_3 en B_4 worden gevormd door de beide helften van een dubbeltriode ECC 81. B_5 is een spanningstabiliseerbuis 85 A 2. Weerstanden in kΩ, capaciteiten in μF.

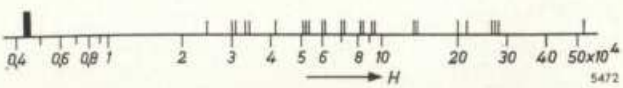


Fig. 15. Gemeten waarden van de rejectiefactor H (kleine streepjes) en berekende minimale waarde H_{min} (dikke streep) van de in fig. 14 weergegeven schakeling.

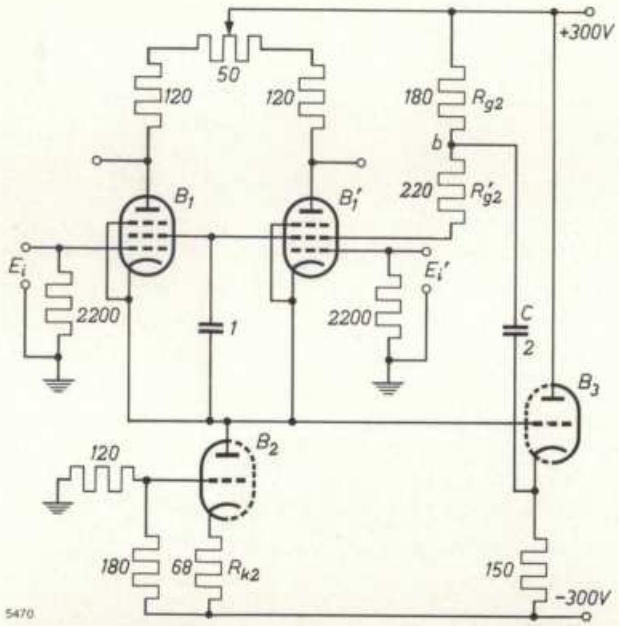


Fig. 12. Verschilversterker met twee pentodes E 80 F. De triodes B_2 en B_3 worden gevormd door de beide helften van de dubbeltriode ECC 81. De weerstanden zijn in kΩ, de capaciteiten in μF aangegeven. De potentiometer van 50 kΩ wordt zodanig ingesteld dat in de rusttoestand de anodespanningen van de pentodes niet te veel verschillen, zodat de beide buizen ongeveer de gewenste instelling hebben.

Fig. 13. Gemeten waarden van de rejectiefactor H (kleine streepjes) en berekende minimale waarde H_{min} (dikke streep) van de in fig. 12 weergegeven schakeling.

stabiliseerbuis B_5 van het type 85 A 2. Omdat de differentiaalweerstand van een dergelijke buis met toenemende frequentie toeneemt, is een condensator van 0,1 μF parallel met B_5 geschakeld. De weerstand van 10 kΩ tussen deze condensator en B_5 dient om eventuele onstabiliteitsverschijnselen, die bij een dergelijke schakeling kunnen optreden, te voorkomen.

Aannemend dat alle in aanmerking komende grootheden onderlinge afwijkingen van 10% kunnen hebben, berekent men voor de minimale waarde van de rejectiefactor van deze schakeling 4500. De gemeten waarden met 25 willekeurig gekozen buizencombinaties zijn in *fig. 15* uitgezet, weer op een logaritmische schaal. De laagste gemeten waarde, 24 000, is veel groter dan de berekende minimale waarde. De oorzaak hiervan is dat de spreiding in steilheid en versterkingsfactor van de buis E 80 CC in werkelijkheid hoogst zelden de waarde van 10% benadert. Hierdoor is de kans groot dat bij schakelingen met deze buis grotere waarden van H worden gevonden dan bij gebruik van een ander buistype

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dat een grotere steilheid en een grotere versterkingsfactor heeft, doch waarbij deze grootheden ook een grotere spreiding vertonen.

De metingen waarvan de resultaten in fig. 15 zijn weergegeven, zijn uitgevoerd met gelijkspanning. Is de verschilversterker alleen bedoeld voor wisselspanningen, dan kan de schakeling belangrijk worden vereenvoudigd. Men kan dan nl., zoals reeds in fig. 6 werd geschetst, de spanning voor de roosters van de buizen B_2 en B_2' verkrijgen door middel van een spanningsdeler tussen de anodespanningsbron en de katodes van B_1 en B_1'. De spanningsvariaties aan de katodes van de laatstgenoemde buizen kunnen naar de roosters van B_2 en B_2' worden overgebracht door middel van een condensator. In *fig. 16* is het schema getekend van een schakeling waaraan met een aantal buizencombinaties metingen zijn verricht bij een frequentie van 100 Hz. Voor B_1, B_1', B_2 en B_2' werden weer twee dubbeltriodes E 80 CC gebruikt, terwijl B_3 een helft was van een dubbeltriode ECC 81. Bij onderstelling van 10% onderlinge afwijkingen van alle in aanmerking komende grootheden, is de berekende minimale waarde van de rejectiefactor 6500. In *fig. 17* zijn weer de gemeten waarden uitgezet, tezamen met de genoemde berekende minimale waarde van H. De kleinste gemeten waarde bij 25 willekeurig gekozen buizencombinaties was 24 000. Ook hier ligt door de geringe spreiding van de E 80 CC deze laagste gemeten waarde aanzienlijk hoger dan de berekende.

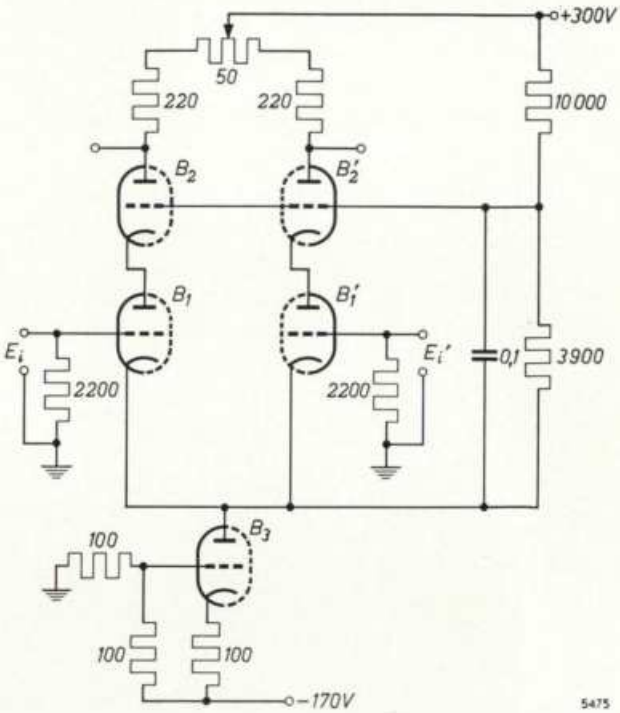


Fig. 16. Verschilversterker voor wisselspanningen met twee cascodes, die zijn samengesteld uit twee dubbeltriodes E 80 CC. De buis B_3 is één helft van een dubbeltriode ECC 81. Weerstanden in kΩ, capaciteiten in μF.

Fig. 17. Gemeten waarden van de rejectiefactor H (kleine streepjes) en berekende minimale waarde H_{min} (dikke streep) van de in fig. 16 weergegeven schakeling.

In deel II van dit artikel zullen enkele problemen ter sprake komen die zich kunnen voordoen bij de constructie van meertraps-verschilversterkers. Verder zullen enkele aanwijzingen worden gegeven voor een juiste wijze van aansluiten van de versterker op de punten waartussen het te meten spanningsverschil bestaat. Ten slotte zullen enkele gevallen worden genoemd waar men verschilversterkers met voordeel kan toepassen ook als de opgave niet bestaat in het versterken van het spanningsverschil van twee punten.

Samenvatting. Een doelmatige ééntrapsverschilversterker kan worden gevormd door een balansversterker waarbij in de gemeenschappelijke katodeleiding van de buizen een element is geschakeld dat een zeer grote differentiaalweerstand heeft. Dit laatste is nodig voor het verkrijgen van een grote waarde van de discriminatiefactor. Om een grote rejectiefactor te kunnen garanderen, zelfs als de parameters van de buizen en andere onderdelen hun maximale afwijking (in ongunstige richting) van de nominale waarde hebben, moet niet alleen de differentiaalweerstand in de katodeleiding groot zijn, doch moeten ook de buizen een grote versterkingsfactor hebben. Als buizen kunnen pentodes ofwel cascodes worden toegepast, waarbij de spanning van de schermroosters der pentodes of van de roosters der „bovenste" buizen van de cascodes zo nauwkeurig mogelijk de spanningsveranderingen van de katodes moet „volgen". Enige schakelingen worden beschreven waarmede dit wordt bereikt. De grote differentiaalweerstand in de gemeenschappelijke katodeleiding kan worden verkregen met schakelingen waarin pentodes, triodes of cascodes worden toegepast. Van drie schakelingen worden de berekende minimale waarde van de rejectiefactor en de resultaten van metingen met 25 willekeurige buizencombinaties vermeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

TOEPASSING VAN REGELTHEORIE OP REGELKRINGEN MET LINEAIRE ELEMENTEN

door M. van TOL *).

621-53.001

Tot het begin van de jaren '40 was de regeltechniek in hoge mate een praktijkvak; maatregelen ter verbetering van een niet goed werkende regelinstallatie berustten tot dan dikwijls meer op gevoel en ervaring dan op theoretisch inzicht in de situatie. Verandering trad in toen velen bekend raakten met het feit dat de theorie van regelinstallaties en servomechanismen direct ontleend kon worden aan die van versterkers met terugkoppeling.

In het hier volgende artikel wordt een indruk gegeven van de wijze waarop men regelproblemen thans theoretisch behandelt met de methode der complexe grootheden, een rekenwijze die in de wisselstroomtheorie algemeen wordt toegepast. Onder andere worden de frequentiekarakteristieken berekend van de temperatuurregeling van de subkritische suspensiereactor te Arnhem, die vroeger in dit tijdschrift beschreven is.

Inleiding

Het uitrusten van een installatie met een regelinrichting die de waarde van een of andere belangrijke grootheid — b.v. de temperatuur, een vloeistofniveau of een gasstroom — automatisch constant houdt, is in wezen niets anders dan het aanbrengen van een tegenkoppeling met versterking. Het uitgangssignaal Θ_o van het instrument dat de desbetreffende grootheid meet, wordt immers vergeleken met een referentiesignaal Θ_i, en het verschil ε van beide fungeert, na versterkt te zijn, als stuursignaal voor het corrigerende orgaan (*fig. 1*). Het is dan ook niet verwonderlijk dat de regeltheorie parallel loopt met de theorie van de versterkers met negatieve terugkoppeling en die van de elektrische netwerken, die tussen 1920 en 1930 werd ontwikkeld ten behoeve van de elektronentechniek [1]).

Bij het theoretische onderzoek naar de eigenschappen van een systeem met automatische regeling beschouwt men de kring die gevormd wordt (vgl. fig. 1) door: de installatie waarin het te regelen proces plaatsvindt, het meetorgaan, het regelorgaan en het corrigerende orgaan. Indien alle elementen die gezamenlijk de regelkring vormen, lineair zijn, kan men het probleem exact behandelen met behulp van complexe functies. Andere methodes zullen we in dit artikel buiten beschouwing laten.

Zo goed als men bij het onderzoek naar de eigenschappen van een versterker met tegenkoppeling, bij gebruik van de genoemde methode, uitgaat van de eigenschappen die de versterker heeft zonder tegenkoppeling, zo begint men ook hier met het geval dat de regelkring ergens geopend is — b.v. in fig. 1 bij het streeplijntje —, en men stelt voor de „opengeknipte" kring de zg. overbrengingsverhouding op. Dit is de verhouding van de complexe grootheden die men, evenals in de

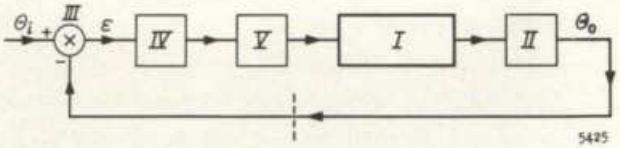


Fig. 1. Schematische voorstelling van een installatie met een automatisch geregeld proces. *I* installatie waarin het proces plaatsvindt. *II* meetinstrument waarmee de constant te houden grootheid wordt gemeten. Het uitgangssignaal Θ_o hiervan wordt in *III* vergeleken met het referentiesignaal Θ_i. Het verschil ε van Θ_o en Θ_i is ingangssignaal voor het regelorgaan *IV*, welks uitgangssignaal het corrigerende orgaan *V* bestuurt. Dit laatste beïnvloedt op zijn beurt rechtstreeks de constant te houden grootheid.

wisselstroomtheorie, kan toevoegen aan een sinusvormig ingangs- en uitgangssignaal — beide met hoekfrequentie ω — door de goniometrische functie te vervangen door een e-macht met imaginaire exponent. Met de hierboven voor het ingangs- en het uitgangssignaal gebruikte symbolen Θ_i en Θ_o werden in feite reeds deze complexe grootheden bedoeld.

Gewoonlijk splitst men de overbrengingsverhouding in een reële constante factor K en een complexe functie $G(j\omega)$. Deze functie beschrijft het verloop met ω zowel van de versterking (amplitudeverhouding) als van de fazedraaiing φ tussen ingangs- en uitgangssignaal. Omdat alle elementen van de regelkring verondersteld worden lineair te

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

[1]) Men vindt deze theorie o.m. in H. W. Bode, Network analysis and feedback amplifier design, Van Nostrand, New York 1945.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn, is KG eenvoudig gelijk aan het produkt van de overbrengingsverhoudingen K_1G_1, K_2G_2, enz. van de afzonderlijke elementen. Het doet er dus niet toe, waar men de regelkring opengeknipt denkt.

We willen in dit artikel aan de hand van drie voorbeelden een indruk geven van de wijze waarop men in de praktijk, uitgaande van een analyse van het fysische gebeuren, een overbrengingsverhouding berekent. Het eerste voorbeeld hangt samen met de regeling van een niveau in een vat, een probleem dat in de chemische techniek veelvuldig voorkomt; het tweede betreft de temperatuurregeling in het voedingskanaal van een onlangs in dit tijdschrift beschreven glasoven [2]), en het derde de temperatuurregeling van de suspensie in de, eveneens vroeger in dit tijdschrift behandelde, subkritische kernreactor die zich in een der laboratoria van de N.V. KEMA te Arnhem bevindt [3]). De lezer zal daarbij bemerken dat men bij de zojuist genoemde fysische analyse niet zelden zijn toevlucht moet nemen tot benaderingen.

Ter wille van de niet regeltechnisch geschoolde lezer laten we aan de te behandelen voorbeelden een hoofdstuk voorafgaan waarin de centrale betekenis van de KG-functie voor de regeltheorie in 't kort wordt uiteengezet.

De overbrengingsverhouding

De betekenis van de KG-functie voor de regeltheorie blijkt direct indien men de volgende twee vragen tracht te beantwoorden. Ten eerste de vraag in welke mate de invloed van een storing Θ_s door de aanwezigheid van de regelinrichting verminderd wordt, en ten tweede de vraag hoe het staat met de stabiliteit van de (gesloten) regelkring. We beschouwen daartoe eerst een geval waarbij de storing uitsluitend kan optreden achter het laatste blok (fig. 1), zodat het schema van de regelkring gereduceerd wordt tot dat van *fig. 2*. In dit geval geldt:

$$\Theta_o = KG\varepsilon + \Theta_s, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

of, daar $\varepsilon = \Theta_i - \Theta_o$:

$$(1 + KG)\Theta_o = KG\Theta_i + \Theta_s,$$

waaruit volgt:

$$\Theta_o = \frac{KG\Theta_i + \Theta_s}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Indien men zich alleen interesseert voor de vraag in welke mate een sinusvormige storing onderdrukt wordt, mag $\Theta_i = 0$ gesteld worden en vindt men:

$$\frac{\Theta_o}{\Theta_s} = \frac{1}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

De absolute waarde van deze verhouding wordt aangeduid met de naam „deviation ratio" [4]).

Zoals men ziet, wordt het effect van de storing niet volledig weggewerkt maar alleen met de door (3) gegeven factor gereduceerd. Het resterende effect is de zg. afwijking. (Een afwijking nul kan men in theorie bereiken door in de regelkring een zg. integrator op te nemen; voor een dergelijk element wordt G nl. oneindig groot als ω tot nul nadert.)

Voor beschouwingen omtrent de stabiliteit van de schakeling speelt de grootte van Θ_s geen rol en kan men (2) reduceren tot:

$$\frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{KG}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

De betekenis van deze formule zal aanstonds nog nader ter sprake komen.

Thans zullen we het geval bezien dat de storing niet optreedt aan het eind van de regelkring maar in een punt ergens in het midden (*fig. 3*). De overbrengingsverhouding van de blokken die vóór dit punt gelegen zijn, stellen we voor door K_1G_1, die van de overige door K_2G_2. In dit geval geldt voor het uitgangssignaal Θ_o (voor $K_1G_1K_2G_2$ schrijven we direct KG):

$$\Theta_o = KG\varepsilon + K_2G_2\,\Theta_s, \quad . \quad . \quad (5)$$

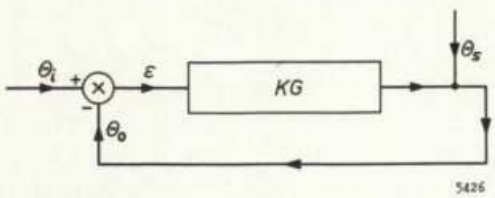


Fig. 2. Blokschema van regelkring waarin de storing Θ_s uitsluitend kan optreden achter het laatste blok (vgl. fig. 1).

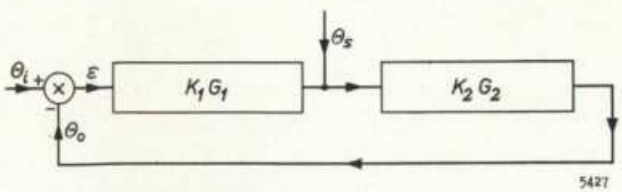


Fig. 3. Regelkring waarbij het stoorsignaal Θ_s ergens midden in de kring optreedt. De overbrengingsverhouding van de vóór dit punt gelegen blokken is K_1G_1, die van de overige K_2G_2.

[2]) Zie P. M. Cupido, Philips techn. T. **22**, 324-333, 1960 (no. 9/10).

[3]) Zie B. L. A. van der Schee en M. van Tol, Philips techn. T. **21**, 98, 1959.

[4]) J. M. L. Janssen, Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. (ASME) **76**, 1303, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waaruit men op dezelfde wijze als hierboven kan afleiden:

$$\Theta_o = \frac{KG\Theta_i + K_2G_2\Theta_s}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Uit deze formule leiden we eerst weer de „deviation ratio" af, het quotiënt van de waarden die het uitgangssignaal heeft mèt en zonder regeling voor het geval dat $\Theta_i = 0$ is. We vinden:

$$\frac{\Theta_o}{\Theta_s K_2 G_2} = \frac{1}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Voor het stabiliteitsonderzoek stellen we in verg. (6) weer $\Theta_s = 0$. Dit levert opnieuw:

$$\frac{\Theta_o}{\Theta_i} = \frac{KG}{1 + KG}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Men ziet dat niet alleen de vergelijkingen (4) en (8) identiek zijn — dat is triviaal — maar dat óók het rechterlid van verg. (7) gelijk is aan dat van (3). *Algemeen geldt, dat men, zowel voor het onderzoek naar de stabiliteit als naar de factor waarmee storingen gereduceerd worden, de overbrengingsverhouding KG van het geheel der in serie geschakelde blokken (= de opengeknipte regelkring) nodig heeft.*

Behalve mathematisch kan men het gedrag van een opengeknipte regelkring ook grafisch karakteriseren, en wel hetzij door het verloop van de functie KG te tekenen in het complexe vlak (het Nyquist-diagram), hetzij door eerst de afzonderlijke amplitude- en fazekarakteristiek uit KG af te leiden en die op een of andere wijze in grafiek te brengen. De eerste wijze van uitzetten is o.m. van nut indien men snel voor een zekere frequentie de absolute waarde P van de functie $1+KG$ wil vinden. Men moet daartoe het desbetreffende punt van het Nyquist-diagram verbinden met het punt (—1, 0). Een voorbeeld vindt men in *fig. 4*.

De frequentiekarakteristieken zet men, behalve lineair, ook dikwijls logaritmisch uit: de amplitudekarakteristiek dubbellogaritmisch en de fazekarakteristiek enkellogaritmisch (Bode-diagram). Deze methode biedt voordelen als men de maximaal toelaatbare versterking wil bepalen.

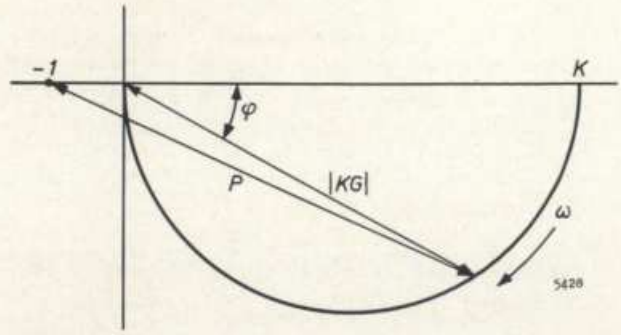


Fig. 4. Nyquist-diagram van de functie $KG = K(1 + j\omega\tau)^{-1}$. De afstand van een punt van de kromme tot de oorsprong geeft de absolute waarde van KG voor de desbetreffende frequentie, d.i. de versterking. Storingen worden verminderd met de factor P die men vindt uit de afstand van het punt tot het punt (—1,0). De fazedraaiing φ tussen uitgangs- en ingangssignaal loopt hier van 0 tot —90°.

Wat de stabiliteit betreft, beperken we ons hier tot de opmerking dat de frequentiekarakteristieken zó moeten zijn dat bij de frequentie ω_c waarbij $\varphi = -180°$ is, en waarbij de tegenkoppeling dus in een meekoppeling is overgegaan, de versterking $|KG(j\omega_c)|$ kleiner dan één is. In het Nyquist-diagram: de kromme mag niet het punt (—1, 0) omvatten [5]).

Behalve met Bode- of Nyquist-diagrammen werkt men ook wel met de wijzen van uitzetten die *fig. 5* toont. Die van fig. 5*a*, de zg. Nichols-kaart, kan men beschouwen als een

[5]) Voor gecompliceerde regelinstallaties is de hier gegeven formulering van het stabiliteitscriterium te simplistisch. Voor betrekkelijk eenvoudige installaties echter, zoals in dit artikel ter sprake zullen komen, is ze voldoende. Een uitvoerige behandeling van het stabiliteitsprobleem vindt men o.a. in G. S. Brown en D. P. Campbell, Principles of servomechanisms, Wiley and Sons, New York 1948, en in G. J. Thaler en R. G. Brown, Servomechanism analysis, McGraw-Hill, New York 1953.
De relatie tussen stabiliteit en versterking zal uitvoerig ter sprake komen in een artikel in het volgende nummer van dit tijdschrift.

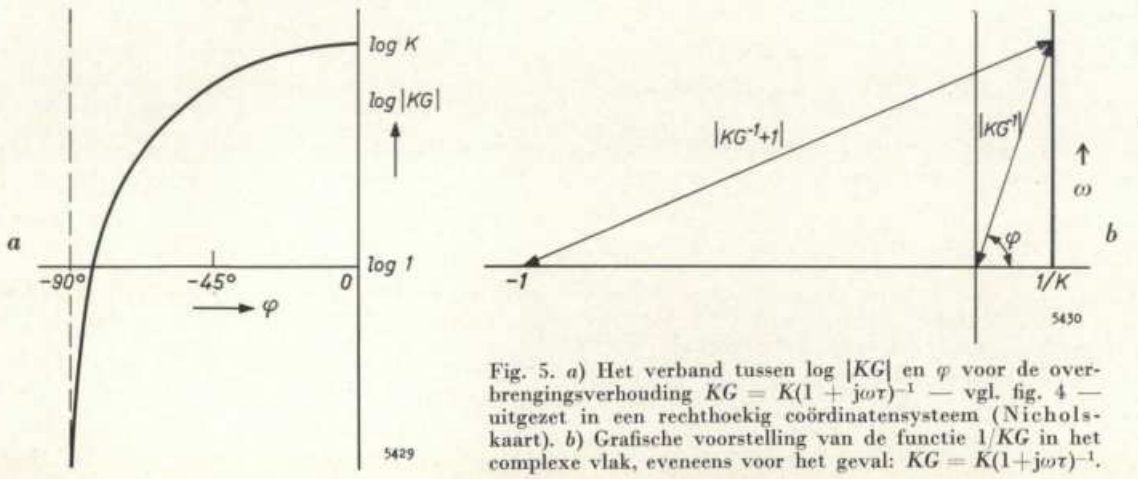


Fig. 5. *a*) Het verband tussen log $|KG|$ en φ voor de overbrengingsverhouding $KG = K(1 + j\omega\tau)^{-1}$ — vgl. fig. 4 — uitgezet in een rechthoekig coördinatensysteem (Nichols-kaart). *b*) Grafische voorstelling van de functie $1/KG$ in het complexe vlak, eveneens voor het geval: $KG = K(1+j\omega\tau)^{-1}$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Nyquist-diagram dat niet is uitgezet in poolcoördinaten maar (enkellogaritmisch) in rechthoekige coördinaten. In fig. 5*b*, het zg. omgekeerde Nyquist-diagram, is de reciproke waarde van KG uitgezet in het complexe vlak. Deze wijze van uitzetten is nuttig indien men snel de karakteristiek van de gesloten kring wil bepalen. Uit (4) volgt immers: $\Theta_i/\Theta_o = (1 + KG)/KG = KG^{-1} + 1$.

Voorbeeld van het opstellen van de KG-functie voor één element

Als voorbeeld van de wijze waarop men de overbrengingsverhouding van een element bepaalt, kiezen we dat van een open bak waar water instroomt uit een kraan, stroom I_1, en die tegelijkertijd leegloopt door een afvoer, stroom I_2. We veronderstellen dat de bak overal even wijd is, bodemoppervlakte F, zodat de vulhoogte H evenredig is met de hoeveelheid water V die zich in de bak bevindt (*fig. 6*). Verder veronderstellen

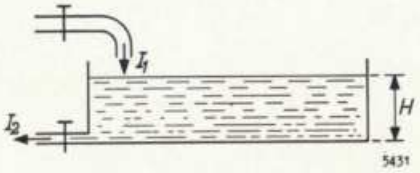


Fig. 6. Ter berekening van de overbrengingsverhouding van een bak die gevuld wordt door de (onafhankelijk variabele) waterstroom I_1 en leegloopt met de stroom I_2, waarvan de grootte evenredig is met de vulhoogte H.

we dat de stroom I_2 evenredig is met H; in formule: $I_2 = c \times H$. Indien I_1 constant is (waarde I_o), heeft H in de evenwichtstoestand een zodanige waarde H_o dat I_2 gelijk is aan I_o, en geldt er dus: $H_o = I_o/c$. We moeten nu de vraag beantwoorden, hoe H om de waarde H_o gaat schommelen indien I_1 niet constant is, maar een sinusvormige rimpel vertoont met amplitude $\hat{i}_1$ en hoekfrequentie ω. In formule:

$$I_1 = I_o + \hat{i}_1 \sin \omega t.$$

Dit probleem wordt beschreven door de differentiaalvergelijking

$$I_1 - I_2 = \frac{dV}{dt} = F\frac{dH}{dt},$$

of, als we H vervangen door $H_o + h$ en in aanmerking nemen dat $I_o = c\,H_o$ is:

$$F\frac{dh}{dt} + c\,h = \hat{i}_1 \sin \omega t. \quad . \; . \; . \quad (9)$$

Men kan een dergelijke vergelijking snel oplossen door te zoeken naar een oplossing van de vorm $\bar{h} = h\,e^{j\omega t}$ van de vergelijking

$$F\frac{d\bar{h}}{dt} + c\,\bar{h} = \bar{i}_1. \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

Hierin is $\bar{h}$ de aan h toegevoegde complexe grootheid, en $\bar{i}_1$ die welke aan $\hat{i}_1 \sin \omega t$ wordt toegevoegd: $\bar{i}_1 = \hat{i}_1\,e^{j\omega t}$. Substitueert men de formule voor $\bar{h}$ in (10), dan krijgt men:

$$Fj\omega\bar{h} + c\bar{h} = \bar{i}_1,$$

of:

$$\bar{h} = \frac{\bar{i}_1}{Fj\omega + c} = \frac{\bar{i}_1/c}{1 + j\omega\tau}. \quad . \; . \quad (11)$$

Hierin is het quotiënt F/c, waarvan men gemakkelijk kan verifiëren dat het de dimensie van een tijd heeft, voorgesteld door τ. Daar het bij het zoeken naar de KG-functie juist gaat om het vinden van de verhouding tussen de aan ingangs- en uitgangssignaal toegevoegde complexe grootheden, geeft vergelijking (11) reeds de oplossing:

$$KG = \frac{1/c}{1 + j\omega\tau},$$

waarin dus

$$K = 1/c \quad \text{en} \quad G = \frac{1}{1 + j\omega\tau}. \quad . \quad (12)$$

(De factor $1/c$ in de teller van (11) is hier geen versterkingsfactor maar een dimensiefactor, die er zijn oorzaak in vindt dat we als uitgangsgrootheid h gekozen hebben en niet de stroom I_2. In het laatste geval zou $K = 1$ geweest zijn; versterking van het ingangssignaal vindt niet plaats.)

In de praktijk blijkt de hier gevonden vorm van de G-functie zeer dikwijls op te treden. De werking van de meeste in regelinrichtingen toegepaste schakelelementen kan men beschrijven door een serieschakeling van enige blokken — net zoveel als er tijdconstanten zijn — met een overbrengingsverhouding van de vorm $K(1 + j\omega\tau)^{-1}$. Een paar van de meest bekende elektrische schakelingen die deze overbrengingsverhouding hebben, vindt men in *tabel I*. De laatste hiervan kan men beschouwen als het elektrische vervangingsschema van de zojuist behandelde waterbak met afvoer.

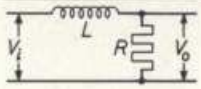
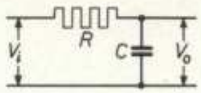
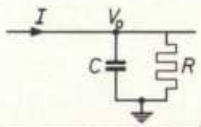
Regeling van de temperatuur van het glas in het voedingskanaal van een kuipoven

Als tweede voorbeeld bespreken we de regeling van de temperatuur van het vloeibare glas in het voedingskanaal van een kuipoven. In het aangehaalde artikel [2]) is erop gewezen dat er bij de glasbereiding naar gestreefd dient te worden, de wordingsgeschiedenis van al het geproduceerde glas zoveel mogelijk dezelfde te doen zijn. Om dit te bereiken, moet men vooral de temperatuur van het vloeibare glas in de smeltkuip constant trachten te

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Enige elektrische schakelingen waarvan de overbrengingsverhouding in de vorm $K(1 + j\omega\tau)^{-1}$ gebracht kan worden. Bij de derde hebben ingangs- en uitgangsgrootheid een verschillende dimensie en treedt er een dimensiefactor R op. De versterkingsfactor is steeds gelijk één.

Schakeling	Ingangs- en uitgangsgrootheid	Overbrengingsverhouding	τ
	V_i, V_o	$\frac{R}{R+j\omega L} = \frac{1}{1+j\omega L/R}$	L/R
	V_i, V_o	$\frac{1/j\omega C}{1/j\omega C + R} = \frac{1}{1+j\omega RC}$	RC
	I, V_o	$\frac{1}{1/R+j\omega C} = R\frac{1}{1+j\omega RC}$	RC

houden. Daar dit niet rechtstreeks mogelijk is, worden diverse grootheden die de glastemperatuur beïnvloeden, afzonderlijk gestabiliseerd (zg. conditieregeling). Dit zijn: de temperatuur van de olie voor de branders, de druk van de lucht waarmee de olie verstoven wordt, de oliestroom, de stroom verbrandingslucht, — eventueel alléén de luchtstroom en de verhouding tussen lucht- en oliestroom —, de druk van de verbrandingsgassen boven het glas en het niveau in de kuip. Uit de smeltkuip stroomt het glas via de werkkuip en een voedingskanaal naar de verwerkingsmachine. Daar de glasstroom naar de machine constant moet zijn, wordt de temperatuur in het voedingskanaal afzonderlijk geregeld, en wel op zeer rigoureuze wijze; de viscositeit van het glas varieert nl. sterk met de temperatuur. De laatstgenoemde temperatuurregeling zullen we thans nader bezien.

De temperatuur van het glas in het voedingskanaal wordt geregeld met behulp van een elektrische thermometer die zich in het vloeibare glas bevindt en waarvan het uitgangssignaal de branders — in dit geval gasbranders — bestuurt (*fig. 7*); de wijze waarop hier de conditieregeling plaatsvindt, laten we buiten beschouwing.

Het blokschema van de desbetreffende regelkring vindt men afgebeeld in *fig. 8*. Hierin is blok *I* het kanaal met glas, waaraan een zekere warmtestroom wordt toegevoerd en dat dientengevolge de temperatuur Θ_t aanneemt. Blok *II* is de thermometer; het uitgangssignaal Θ_0 hiervan wordt vergeleken met de ingestelde waarde Θ_i. Het verschil ε wordt door blok *III* versterkt — we nemen voorlopig aan lineair en onafhankelijk van de frequentie; versterkingsfactor A. Het uitgangssignaal van *III* bestuurt de klep *IV* die de gastoevoer regelt, en daarmee indirect de warmtestroom die naar het glas vloeit. We zullen thans trachten van deze blokken de overbrengingsverhouding te vinden.

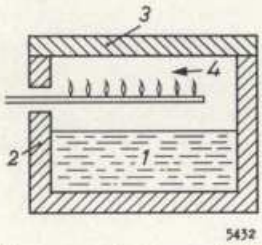


Fig. 7. Het verhitten van vloeibaar glas in het voedingskanaal van een glasoven. *1* glasmassa. *2* wand van het kanaal. *3* deksel. *4* gasbrander.

We zullen aanstonds plausibel maken dat het kanaal met vloeibaar glas, evenals hierboven de waterbak, zich in principe gedraagt als een elektrische keten met weerstand en capaciteit in parallelschakeling (zie voorbeeld 3 van tabel *I*). De stroom I representeert de warmtestroom die de branders aan het glas toevoeren, de capaciteit C de warmtecapaciteit van het glas, R de warmteweerstand langs welke de warmte afvloeit, V_0 de constant te houden glastemperatuur. Storingen kunnen optreden door fluctuaties zowel in I als in C als in de weerstand. Fluctuaties in C heeft men b.v. als het glasniveau varieert, fluctuaties in R treden b.v. op ten gevolge van variaties in de trek van de schoorsteen. We zullen ons beperken tot het beschouwen van de variaties in I. Stellen we RC gelijk aan τ_I, dan geldt voor de overbrengingsverhouding voor het blok *I* derhalve:

$$G_I = \frac{1}{1 + j\omega\tau_I} . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

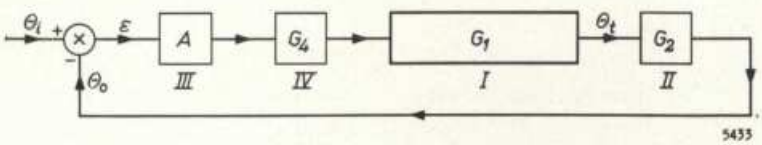


Fig. 8. Blokschema (vereenvoudigd) van de temperatuurregeling in het voedingskanaal van een glasoven. *I* kanaal met vloeibaar glas, *II* thermometer, *III* lineaire versterker, *IV* regelklep.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Door de zeer grote waarden die de warmtecapaciteit van het glas en de warmteweerstand hebben, is τ_I van de orde van grootte van een half uur.

Ten einde aannemelijk te kunnen maken dat men dit geval in eerste benadering inderdaad mag identificeren met het derde voorbeeld van tabel I, zullen we aan de hand van fig. 7 nagaan wat er in het kanaal gebeurt. De warmte die de gasvlammen leveren, komt deels ten goede aan het glas en deels aan de wand en het deksel van het kanaal. De verhouding tussen de beide deelstromen zal in eerste benadering onafhankelijk zijn van de grootte van de totale stroom. De wijze waarop de warmte van de vlam naar het glas getransporteerd wordt, kunnen we buiten beschouwing laten. Voor ons is alleen van belang het feit dat er een warmtestroom naar het glas vloeit die afhangt van de gasstroom die aan de branders wordt toegevoerd en die nagenoeg zonder vertraging op een verandering in de gasstroom reageert.

Rest nog te verklaren dat men de warmteafvoer mag beschouwen als het vloeien van een stroom door een weerstand ten gevolge van een potentiaalverschil V_0 dat het temperatuurverschil ΔT tussen het glas en de omgeving van de oven representeert. Het warmtetransport geschiedt deels door straling en deels door geleiding en convectie: straling van glas naar deksel en wanden, geleiding door het glas zelf en door de wand naar buiten, en vervolgens warmteafvoer van de buitenkant van het kanaal door straling, geleiding en convectie. De wijze waarop de warmtestroom afhangt van het genoemde temperatuurverschil, kan men uiteraard uitdrukken in een machtreeks. Vooral door de aanwezigheid van een stralingsaandeel, zullen in deze reeks ook hogere machten van ΔT voorkomen. Hieruit volgt dat de warmteweerstand, d.i. de afgeleide van de warmtestroom naar ΔT, niet onafhankelijk van ΔT is en dus in het elektrische vervangingsschema slechts door een zuivere weerstand mag worden voorgesteld indien ΔT nagenoeg constant is. Aan deze voorwaarde is in ons geval voldaan: de variaties van de temperatuur van het vloeibare glas in het voedingskanaal zijn slechts van de orde van grootte van 1° C.

Wat de overige blokken van de kring betreft, kunnen we korter zijn. De thermometer, blok *II*, kan men beschouwen als een (warmte)capaciteit c die geladen wordt door een stroom die toevloeit via een weerstand r. Hier echter is de ingangsgrootheid niet deze stroom maar de spanning die de temperatuur van het glasbad representeert (tabel I, voorbeeld 2). De overbrengingsverhouding G_{II} heeft derhalve weer de vorm $(1 + j\omega\tau_{II})^{-1}$ juist als die van G_1. De waarde van de tijdconstante τ_{II} $(= rc)$ is echter veel kleiner (b.v. een halve minuut). We mogen daarom in eerste benadering de thermometer wel als oneindig snel beschouwen en $G_{II} = 1$ stellen.

De overbrengingsverhouding van het blok *IV*, de klep, moet de betrekking beschrijven tussen het uitgangssignaal van *III* en de warmtestroom die naar de kuip vloeit. Er zijn hier twee stappen te onderscheiden. Het genoemde signaal bestuurt de klep in de gasleiding. Het verband tussen het signaal en de overeenkomstige verandering van de gasstroom zal in het algemeen niet exact lineair zijn. In de tweede plaats is er de relatie tussen de gasstroom naar de vlam en de warmtestroom naar het glas. Ook deze relatie zal niet altijd lineair zijn; de grootte van het lichtgevende deel van de vlam speelt hierin ook een rol [6]). Voor kleine variaties echter mogen we het gedrag van een niet-lineair element zoals het blok *IV* wel als lineair beschouwen. Daar een klep in de regel een zekere traagheid heeft, die gekarakteriseerd kan worden door één tijdconstante, is $G_{IV} = (1 + j\omega\tau_{IV})^{-1}$. Hierin is ook weer τ_{IV} klein ten opzichte van τ_I. Voorlopig zullen we dus $G_{IV} = 1$ stellen. Het blokschema wordt door het invoeren van de genoemde benaderingen voor G_{II} en G_{IV} gereduceerd tot dat van *fig. 9*. De

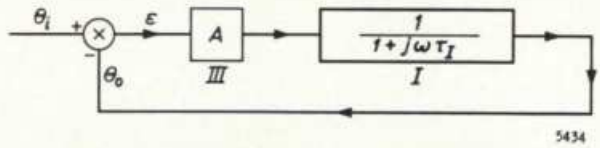


Fig. 9. Vereenvoudigde vorm van het blokschema van fig. 8, verkregen door de G-functie van alle blokken waarvoor $\tau \ll \tau_I$ is, gelijk 1 te stellen. Deze benadering is alleen toelaatbaar als de versterkingsfactor A van *III* niet te groot is.

overbrengingsverhouding van de open kring is dan dus:

$$KG = \frac{A}{1 + j\omega\tau_I}, \quad \ldots . \quad (14)$$

waarin $K = A$, en $G = (1 + j\omega\tau_I)^{-1}$.

We willen thans nog eens kort nagaan welke vereenvoudigingen we hebben aangebracht. Behalve dat we G_{II} en G_{IV} gelijk één stelden, hebben we ook verwaarloosd het feit dat de warmtestroom naar het glas niet ogenblikkelijk reageert op een verandering in de gastoevoer, en wel door de warmtecapaciteit van de brander. Ook is het voorstellen van het glas door één capaciteit een simplificatie, alsmede het verwaarlozen van de capaciteit van de wand. De glastemperatuur, ten slotte, is ook ongetwijfeld niet overal volkomen dezelfde.

---

[6]) Zie blz. 326 van het aangehaalde artikel [2]).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Voor een beschouwing in eerste benadering van het gedrag van de regelkring zijn deze vereenvoudigingen geheel gerechtvaardigd. Voor een beschouwing van de stabiliteit van de kring mag men de aanwezigheid van de kleine tijdconstanten echter niet verwaarlozen. Men wenst immers dat de variaties van de geregelde grootheid zeer klein zijn, en moet daartoe KG zeer groot maken (zie verg. 3). De mate waarin dat zonder gevaar voor de stabiliteit mogelijk is, wordt juist bepaald door de waarde van deze kleine tijdconstanten [7]).

Regeling van de vloeistoftemperatuur in de subkritische suspensiereactor van de KEMA te Arnhem

Alvorens de overbrengingsverhouding van de opengeknipte regelkring van de Arnhemse subkritische suspensiereactor te berekenen, recapituleren we kort de werking van de vroeger beschreven regelinstallatie [3]). In het reactorcircuit (zie *fig. 10*) wordt een suspensie van uraanoxyde in water met constante snelheid rondgepompt. De pomp P deelt daarbij aan het water een vermogen van 3 tot 7 kW mee. Zelfs bij de hoogste werktemperatuur die men kiest, moet er dientengevolge enigszins gekoeld worden. De stabilisatie van de temperatuur tegen variaties van het door de pomp afgegeven vermogen en van het koelvermogen geschiedt door wat sterker te koelen dan nodig is en het teveel te compenseren met behulp van een regelbaar verwarmingselement V, dat zijn warmte rechtstreeks afgeeft aan de suspensie. Dit verwarmingselement wordt bestuurd door een thermometer T die de temperatuur van de suspensie meet. In de evenwichtstoestand geeft de verhitter ongeveer de helft van zijn maximumvermogen (5 kW) af, zodat variaties van ruim 2 kW in het af te voeren vermogen kunnen worden opgevangen. De verhitter is niets anders dan een stuk van de metalen pijpleiding, door de wand waarvan een elektrische stroom vloeit. De thermometer is een weerstandsthermometer (brug van Wheatstone), die een spanning afgeeft evenredig met het verschil tussen de gemeten en de gewenste temperatuur.

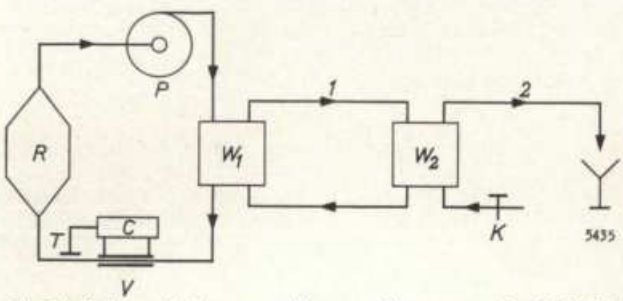


Fig. 10. Schematische voorstelling van het reactorcircuit (links) en de koelcircuits van de subkritische suspensiereactor van de KEMA te Arnhem. R reactorvat. P pomp die de suspensie van uraniumoxide in het reactorcircuit in de richting van de pijlen rondpompt. T weerstandsthermometer. C regelorgaan. V verhitter (corrigerend orgaan). W_1 eerste warmtewisselaar. *1* primair koelcircuit. W_2 tweede warmtewisselaar. *2* secundair koelcircuit. K koelwaterkraan.

[7]) Zie het in noot [5]) aangekondigde artikel.

Een blokschema van de regelinstallatie vindt men in *fig. 11*. Hierin stelt het eerste blok weer een lineaire versterker voor. De overbrengingsverhoudingen van de blokken *I* en *II* beschrijven samen het gedrag van de verhitter (d.w.z. de wijze waarop de temperatuur Θ_t van het uitstromende water reageert op een variatie van het aan de verhitter toegevoerde vermogen), die van het laatste blok (*III*) het gedrag van de thermometer zelf. De storing Θ_s is een verandering van de temperatuur van de suspensie, die eerst opgemerkt wordt als vloeistof met de afwijkende temperatuur de thermometer bereikt. Ook een storing in de netspanning moet op deze plaats worden ingevoerd.

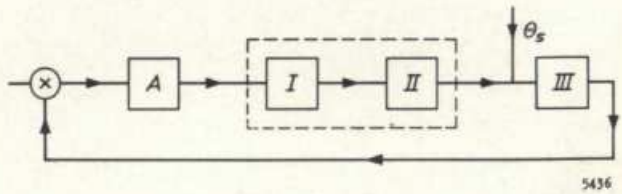


Fig. 11. Blokschema van de regelkring van de temperatuurregelaar van de Arnhemse subkritische suspensiereactor. De blokken *I* en *II* representeren samen de verhitter, blok *III* de thermometer.

Men kan zich afvragen of fig. 11 inderdaad wel de regelkring voorstelt. Er is nl. nòg een gesloten kringloop, en wel die van de rondstromende suspensie. Ten einde duidelijk te maken dat men de laatstgenoemde kringloop buiten beschouwing mag laten, herinneren we eraan dat er bij het ontwerp van de apparatuur is uitgegaan van de overweging dat de regeling ervoor dient om de variaties van het pomp- en het koelvermogen op te vangen [3]). De regelapparatuur behoeft er slechts voor te zorgen dat het water dat de verhitter verlaat, de juiste temperatuur heeft. Het doet er daarvoor niet toe of de suspensie door een open of door een in zichzelf gesloten leiding stroomt.

Het feit dat we de invloed van een eventuele variatie van het warmteverlies in het verdere reactorcircuit buiten beschouwing gelaten hebben, doet aan de juistheid van het blokschema evenmin iets af. Een dergelijke variatie kan worden opgevat als een stoorsignaal dat de kring op dezelfde plaats binnentreedt als de storing Θ_s en kan dus als een deel daarvan beschouwd worden.

Voor het afleiden van de overbrengingsverhouding van de verhitter is het van voordeel om het daarin plaatsvindende proces te splitsen in twee stappen, die in fig. 11 worden voorgesteld door de blokken *I* en *II*. De overbrengingsverhouding K_IG_I van *I* beschrijft hoe de temperatuur van de buiswand reageert op een variatie van het toegevoerde vermogen; de functie $K_{II}G_{II}$, hoe de temperatuur van het uitstromende water reageert op een temperatuurverandering van de buiswand.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij het uitvoeren van deze splitsing is uitgegaan van twee, overigens nauw samenhangende, veronderstellingen. In de eerste plaats is aangenomen dat de temperatuur van de verhitterpijp overal dezelfde is, zodat men inderdaad mag spreken van „de" temperatuur van de pijp. In de tweede plaats is aangenomen dat de variatie in de temperatuur van het uitstromende water verwaarloosbaar is ten opzichte van de temperatuurverandering die de buiswand zelf te zien geeft, d.w.z. we beschouwen de warmtecapaciteit van het water als zéér groot. In de praktijk stroomt de suspensie inderdaad zo snel dat deze veronderstellingen juist zijn. In het andere geval zou de splitsing niet geoorloofd zijn, tenzij er in het blokschema een terugkoppeling van het blok $K_{II}G_{II}$ naar het blok K_1G_1 zou worden aangebracht.

De overbrengingsverhouding K_1G_1 vinden we het snelst met behulp van het elektrische vervangingsschema dat is afgebeeld in *fig. 12a*. Hierin representeert de stroom I het toegevoerde vermogen, C_1 de warmtecapaciteit van het pijpstuk, R_2 de warmteovergangsweerstand tussen pijp en suspensie, C_2 de warmtecapaciteit van de suspensie, V_1 de temperatuur van de buis en V_2 de temperatuur van het water. De weerstanden R_1 en R_3 vertegenwoordigen warmteverliezen die een gevolg zijn van geleiding en convectie van pijp resp. watermassa in de rest van het reactorcircuit. Blijkens metingen is $C_1 \approx 500$ J/°C, $C_2 \approx 400\ C_1$, $R_1 \approx 25 \times 10^{-3}$ °C/watt en $R_2 \approx 2{,}2 \times 10^{-3}$ °C/watt. Hier blijkt dat men C_2 inderdaad als groot ten opzichte van C_1 mag beschouwen. Men kan dus C_2 beschouwen als een kortsluiting van R_3, d.w.z. het schema van fig. 12*a* mag worden vereenvoudigd tot dat van fig. 12*b*, en dit op zijn beurt weer tot het schema fig. 12*c*. De weerstand R_0 daarin is de vervangingsweerstand van R_1 en R_2.

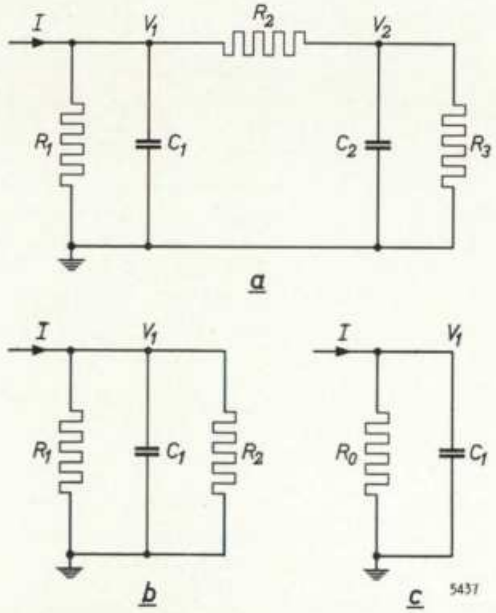


Fig. 12. *a*) Elektrisch vervangingsschema van de werking van de verhitter. Daar $C_2 \gg C_1$ is, kan dit vereenvoudigd worden tot *b*) of, indien men de parallelschakeling van R_1 en R_2 vervangt door de substitutieweerstand R_0, tot *c*).

De overbrengingsverhouding van het eerste blok is dus gelijk aan (tabel I, voorbeeld 3):

$$\frac{V_1}{I} = R_0 \frac{1}{1 + j\omega\tau_1}, \quad \ldots \quad (15)$$

d.w.z. $K_1 = R_0 = 2$ °C/kW en $G_1(j\omega) = (1 + j\omega\tau_1)^{-1}$. De tijdconstante τ_1 is gelijk aan R_0C_1 ofwel 1 seconde.

De overbrengingsverhouding $K_{II}G_{II}$ (de temperatuurverandering van het water als gevolg van die van de verhitter) bepalen we door na te gaan hoe de temperatuur van het uitstromende water gaat schommelen als de temperatuur van de pijp sinusvormig om de evenwichtswaarde T_0 schommelt met een amplitude T_1, die klein is ten opzichte van het gemiddelde temperatuurverschil tussen de pijpwand en het water. (Daar de stroming sterk turbulent is, is de temperatuur van de vloeistof in alle punten van een doorsnee nagenoeg dezelfde.)

Houden we een „schijf" water in het oog die zich met een constante snelheid v door de pijp beweegt en die een dikte dx heeft, dan zien we dat deze bij zijn reis door de pijp steeds een andere wandtemperatuur ontmoet. Het verschil tussen deze temperatuur en de evenwichtstemperatuur van de wand is $T_1 \sin \omega(t_0 + x/v)$. Hierin is t_0 het tijdstip waarop de schijf de buis is binnen gegaan, en x de afstand die de schijf op zeker ogenblik in de buis heeft afgelegd. We gaan nu na hoe groot de hoeveelheid extra warmte is die de schijf op reis door de buis ten gevolge van dit temperatuurverschil krijgt toegevoerd. Gedurende de tijd dx/v die de schijf tussen x en $x+dx$ verblijft, neemt deze een extra-hoeveelheid warmte op die een temperatuurverandering veroorzaakt evenredig met

$$T_1 \sin \omega \left(t_0 + \frac{x}{v}\right) \times \frac{dx}{v}. \quad \ldots \quad (16)$$

Door deze uitdrukking te integreren over de gehele lengte l van de verhitter, vinden we op een evenredigheidsfactor na, hoe de temperatuur van de schijf wanneer deze aan de uitgang is gekomen, afwijkt van de waarde die ze gehad zou hebben indien de wandtemperatuur permanent de waarde T_0 gehad had. Deze afwijking is dus evenredig met

$$\int_0^l T_1 \sin \omega \left(t_0 + \frac{x}{v}\right) \frac{dx}{v}, \quad \ldots \quad (17)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hetgeen kan worden herleid tot:

$$2\tau_{II}\, T_1 \frac{\sin \omega\tau_{II}}{\omega\tau_{II}} \sin \omega(t_0 + \tau_{II}). \quad . \quad (18)$$

Hierin is $\tau_{II} = l/2v$ (ca. 0,15 seconde). Beschouwen we thans de gehele stroom, dat wil zeggen een doorlopende successie van schijven waarvoor de waarde van t_0 steeds een bedrag dx/v groter is, dan kan men concluderen dat het tijdsverloop van de temperatuurafwijking op een constante factor na gegeven wordt door formule (18) indien men daarin t_0 vervangt door $(t-l/v)$, hetgeen gelijk is aan $t-2\tau_{II}$. Dit doet (18) overgaan in:

$$2\tau_{II}\, T_1 \frac{\sin \omega\tau_{II}}{\omega\tau_{II}} \sin \omega(t - \tau_{II}). \quad . \quad . \quad (19)$$

De hiermee overeenkomende complexe grootheid is (we laten de constante factor $2\tau_{II}$ verder weg):

$$T_1 \frac{\sin \omega\tau_{II}}{\omega\tau_{II}} e^{j\omega(t-\tau_{II})}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

We vinden nu $G_{II}(j\omega)$ door (20) te delen door de overeenkomstige complexe uitdrukking $T_1 e^{j\omega t}$ voor het ingangssignaal. Dit levert:

$$G_{II}(j\omega) = \frac{\sin \omega\tau_{II}}{\omega\tau_{II}} e^{-j\omega\tau_{II}}. \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Men kan uit formule (21) aflezen dat de tijd τ_{II} het karakter heeft van een looptijd. Deze looptijd veroorzaakt een met ω evenredige fazedraaiing: $\varphi = -\omega\tau_{II}$ (*fig. 13*). Verder is er een van de frequentie afhangende amplitudefactor $(\sin \omega\tau_{II})/\omega\tau_{II}$ die bij zeer lage frequenties de waarde één heeft en nul wordt als $\omega\tau_{II} = \pi$ is. In het laatste geval doorloopt namelijk iedere schijf vloeistof de verhitter juist in één periode en neemt dus in de ene helft evenveel energie op als ze in de andere helft afstaat.

Het blok *III* van het blokschema beschrijft het gedrag van de weerstandsdraad van de thermometer. Dit gedrag kan met goede benadering gekarakteriseerd worden door één tijdconstante τ_{III} (ca. 0,10 s), zodat:

$$G_{III}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_{III}}. \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

De overbrengingsverhouding van de gehele opengeknipte regelkring, die gelijk is aan het produkt $AK_IG_I(j\omega)\ K_{II}G_{II}\ (j\omega)\ K_{III}G_{III}(j\omega)$, luidt dus:

$$\frac{\Theta_0}{\varepsilon} = AK_I K_{II} K_{III} \frac{1}{1 + j\omega\tau_I} \times \frac{\sin \omega\tau_{II}}{\omega\tau_{II}} e^{-j\omega\tau_{II}} \times \frac{1}{1 + j\omega\tau_{III}}. \quad (23)$$

(Neemt men in aanmerking dat de thermometer zich niet precies aan de uitgang van de verhitter bevindt, maar een eindje verderop in de leiding, dan moet in (23) nog een tweede looptijdfactor worden opgenomen, waarin de tijd τ_{IV} voorkomt die de vloeistof nodig heeft om de desbetreffende afstand af te leggen. Daar $\tau_{IV} \ll \tau_{II}$, kan men deze factor echter verwaarlozen.)

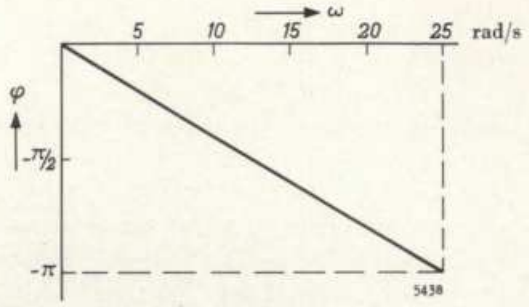


Fig. 13. Fazekarakteristiek van de afgifte van warmte door de verhitter aan het doorstromende water (vgl. formule 21). Door de aanwezigheid van de looptijd τ_{II}, is er een met ω evenredige fazedraaiing. Bij de frequentie $\omega = \pi/\tau_{II}$ ($\approx$ 25 rad/s) is $\varphi = -\pi$.

De uit deze overbrengingsverhouding afgeleide frequentiekarakteristieken vindt men in *fig. 14*, het

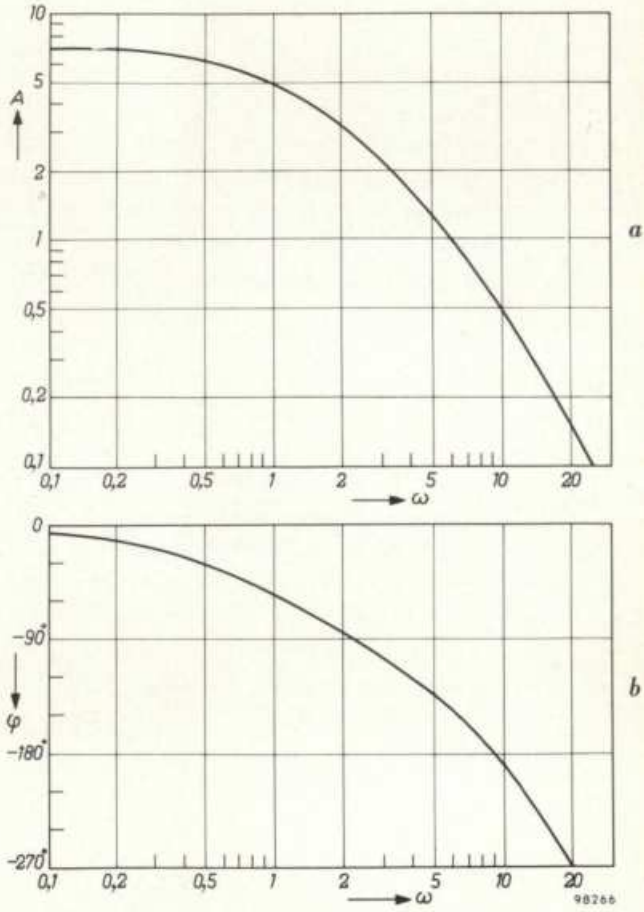


Fig. 14. Frequentiekarakteristieken van de „opengeknipte" regelkring. *a*) Amplitudekarakteristiek. *b*) Fazekarakteristiek. Bij zeer lage frequenties is de versterking ongeveer 7. Voor de waarde van ω waarbij de fazedraaiing $\varphi = 180°$ is, is de versterking kleiner dan 1.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Nyquist-diagram in *fig. 15*. *Fig. 16* ten slotte toont het verloop met ω van de factor P, de reciproke „deviation ratio".

Thans nog een opmerking over het feit (zie fig. 16) dat storingen met hoge frequentie niet weggeregeld worden. Een plotselinge verandering van de koelwaterkraan zal, door de aanwezigheid van het secundaire koelcircuit, niet resulteren in een sprongvormige verandering van de temperatuur van de vloeistof die langs de thermometer stroomt. Een plotselinge verandering van de netspanning

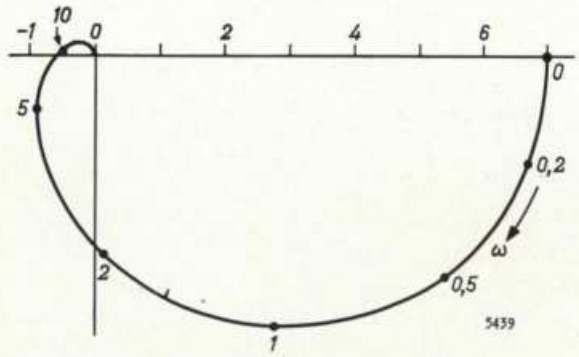


Fig. 15. Nyquist-diagram behorende bij fig. 14.

(d.w.z. van het aan de verhitter teruggevoerde vermogen) zal dit evenmin doen (vgl. fig. 12). Dergelijke snelle veranderingen leiden dus evenzeer tot langzame storingen in de temperatuur van de suspensie — die uiteraard wèl worden weggeregeld — en kunnen derhalve geen onheil aanrichten.

We willen dit artikel besluiten met enige algemene opmerkingen. Uit de bovenstaande voorbeelden bleek reeds dat een exacte berekening van de overbrengingsverhouding dikwijls niet mogelijk is; men moet dan zekere benaderingen invoeren. Bovendien heeft men trouwens nooit met exact lineaire systemen te maken; het veronderstellen van lineariteit is op zichzelf reeds een benadering. In die gevallen waar berekening van de KG-functie in 't geheel niet mogelijk is, kan men in principe de frequentiekarakteristieken bepalen door meting. Men brengt dan opzettelijk een sinusvormige storing aan en registreert de dientengevolge optredende variatie van

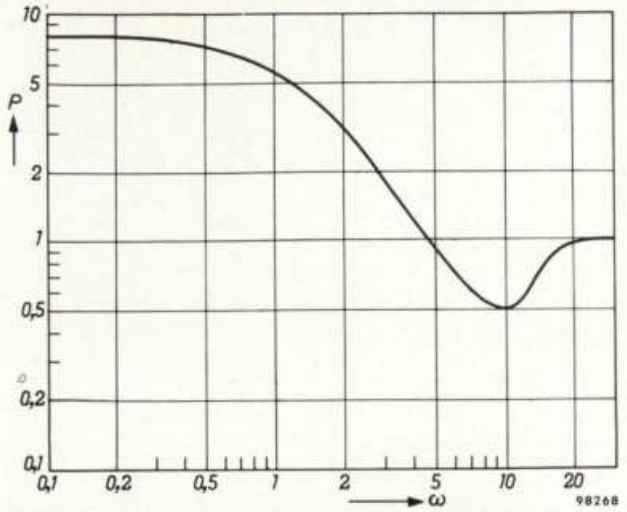


Fig. 16. De factor P (vgl. fig. 4) als functie van ω, afgeleid uit fig. 15.

het uitgangssignaal (Θ_0 in fig. 1). Deze methode is uiteraard onbruikbaar als het systeem niet-lineair is, of indien het onmogelijk is de regelkring te openen. Op grote praktische moeilijkheden stuit men indien er grote tijdconstanten in het spel zijn, omdat men dan bij iedere meting zeer lang moet wachten alvorens het inschakelverschijnsel afgelopen is. In dit laatste geval kan men zijn doel soms bereiken door een sprongvormige storing aan te brengen en te zien hoe het systeem zich dan gedraagt. Uit de aldus verkregen sprongkarakteristiek kan men de frequentiekarakteristieken afleiden en daaruit de waarden van de diverse tijdconstanten.

Samenvatting. Een automatische regelinrichting kan men theoretisch op dezelfde wijze behandelen als een versterker met tegenkoppeling. Men kan het gedrag van een systeem met tegenkoppeling, mits alle elementen lineair zijn, afleiden uit de overbrengingsverhouding $KG(j\omega)$ van de geopende kring. De functie $KG(j\omega)$ is het quotiënt van de complexe grootheden die men kan toevoegen aan een sinusvormig ingangssignaal (hoekfrequentie ω) en het resulterende (sinusvormige) uitgangssignaal. K is een constante factor. Storingen worden verkleind met de factor $|1 + KG|$. De stabiliteit van het systeem is verzekerd als de kromme die KG voorstelt in het complexe vlak, niet het punt $(-1, 0)$ omvat. De KG-functies worden berekend voor 1) een waterbak met toe- en afvoer, 2) een temperatuurregeling van een glasoven en 3) de temperatuurregeling van de subkritische suspensiereactor te Arnhem. De elementen van een regelkring hebben zeer dikwijls de overbrengingsverhouding $KG(j\omega) = K(1 + j\omega\tau)^{-1}$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN EENVOUDIGE ANALOGON-REKENMACHINE VOOR HET BEREKENEN VAN HET KLEURPUNT VAN EEN LICHTBRON

door B. van der WAAL *).

535.651.1

Het bepalen van het kleurpunt van een lichtbron vereist een serie eenvoudige, maar zeer tijdrovende berekeningen. Met de in dit artikel beschreven rekenmachine kunnen deze berekeningen in korte tijd automatisch worden uitgevoerd; de spectrale kleurgevoeligheidsfuncties van het oog, die hierbij moeten worden gebruikt, zijn in het toestel ingebouwd.

De kleur van het uitgezonden licht is een van de belangrijkste kenmerken van een lichtbron. Voor objectieve karakterisering van de kleur kan men deze vastleggen [1]) door drie grootheden X, Y en Z, die worden bepaald met de volgende formules:

$$\left.\begin{aligned} X &= \int S(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda, \\ Y &= \int S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda, \\ Z &= \int S(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (1)$$

Hierin is $S(\lambda)$ de relatieve spectrale energieverdeling van het uitgezonden licht; de functies $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$ zijn de zg. spectrale kleurgevoeligheidsfuncties (trichromatische distributiecoëfficiënten), die in 1931 door de Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) als geldig voor het gemiddelde menselijke oog zijn vastgesteld. Hun grootste waarden liggen resp. in het rood, groen en blauw (zie *fig. 1*). De functies zijn zo gekozen dat $\bar{y}(\lambda)$ overeenstemt met $V(\lambda)$, de spectrale ooggevoeligheidsfunctie.

De kleur van een lichtbron is bepaald door de onderlinge *verhoudingen* van X, Y en Z. Men gebruikt hiervoor:

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

Twee van deze grootheden zijn dan uiteraard voldoende om een kleur vast te leggen (de som $x + y + z$ is 1). Iedere kleur wordt aangeduid door

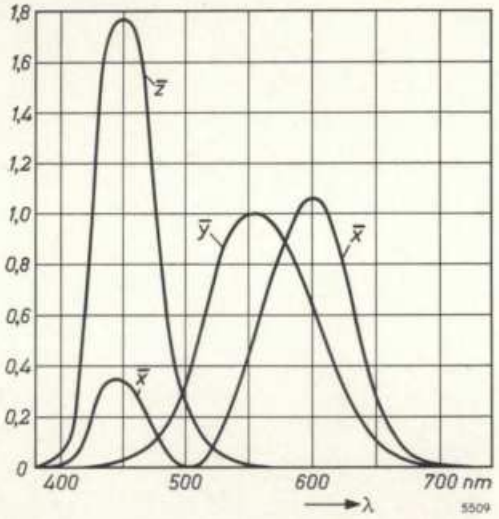


Fig. 1. De door de Commission Internationale de l'Eclairage vastgestelde kleurgevoeligheidsfuncties $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$ van het gemiddelde menselijke oog.

een punt in een plat vlak, en wel door x en y uit te zetten op een rechthoekig assenstelsel. Zo ontstaat de zg. C.I.E.-kleurendriehoek, *fig. 2*. De kleurpunten van monochromatisch licht liggen hierin op een hoefijzervormig gebogen lijn, de „kromme der spectrale kleuren". Op de rechte afsluitlijn, de „purperlijn", liggen de verzadigde purperkleuren, mengsels van rode en violette straling. In het zwaartepunt van de driehoek ligt het witpunt E; hier zijn x, y en z even groot. De overige punten kunnen we beschouwen als de kleurpunten van een mengsel van wit licht met een spectrale kleur of met een kleur op de purperlijn. (Een afbeelding van de kleurendriehoek waarbij ieder punt de bijbehorende kleur vertoont, vindt men in het eerste in noot [1]) aangehaalde artikel.)

De bepaling van het kleurpunt van een lichtsoort

De methode die wordt toegepast voor het bepalen van het kleurpunt van een gegeven lichtsoort, volgt rechtstreeks uit de vergelijkingen (1) en (2). De waarde $S(\lambda)$ van het licht wordt met een spectrale fotometer gemeten bij een serie golflengten, op-

*) Hoofdindustriegroep Licht, Eindhoven.

[1]) Zie b.v.: W. de Groot en A. A. Kruithof, De kleurendriehoek, Philips techn. T. **12**, 141-146, 1950; F. W. de Vrijer, Grondslagen van de kleurentelevisie, Philips techn. T. **19**, 80-91, 1957; P. J. Bouma, Kleuren en kleurindrukken, Meulenhoff, Amsterdam 1946.

De in deze artikelen gebruikte notatie wijkt enigszins af van de thans gebruikte, die zich in hoofdzaak aansluit bij de aanbeveling van de C.I.E.; zie „Vocabulaire International de l'Eclairage", publikatie C.I.E., 1-1-1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

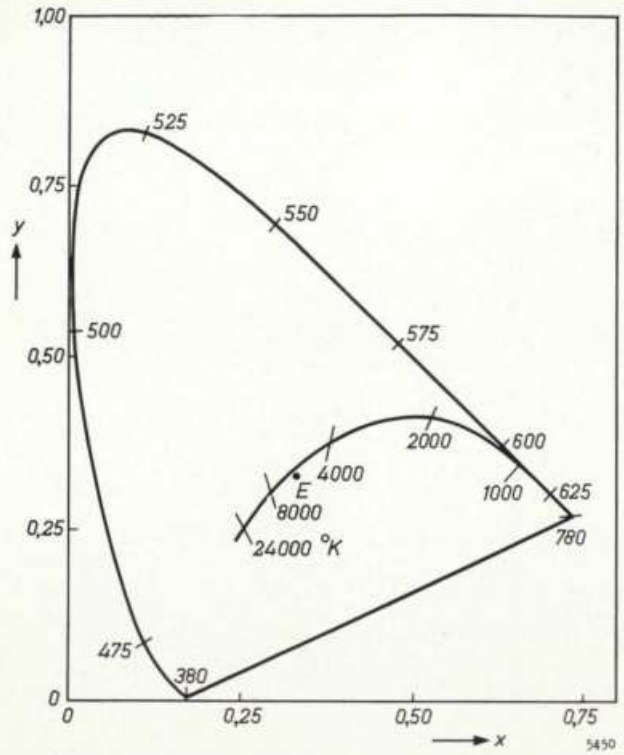


Fig. 2. De C.I.E.-kleurendriehoek in x,y-coördinaten. Bij de kromme van de spectrale kleuren zijn de golflengten in nm aangegeven. E is het witpunt. Op de kromme binnen de driehoek liggen de kleurpunten van de zwarte straler bij verschillende temperaturen.

klimmend met 10 nm, van 385 tot 735 nm. Voor de berekening van X worden deze waarden van $S(\lambda)$ vermenigvuldigd met de bij die golflengten behorende waarden van $\bar{x}(\lambda)$, waarna deze produkten worden opgeteld. (Eigenlijk moet nog worden vermenigvuldigd met de breedte van het voor de meting gebruikte golflengte-interval, maar aangezien men toch alleen de verhoudingen van X, Y en Z wil bepalen, wordt dit hier nagelaten.) Op dezelfde wijze worden Y en Z berekend, waarna x en y worden bepaald door twee delingen volgens verg. (2). Voor de berekening van het kleurpunt van een lichtsoort zijn op deze wijze ca. 100 vermenigvuldigingen nodig, gevolgd door drie optellingen en twee delingen.

Voor het uitvoeren van deze berekeningen hebben wij een eenvoudige analogon-rekenmachine geconstrueerd, waarvan het principe is gegeven in *fig. 3*. Voor elke golflengte λ_n waarbij $S(\lambda)$ wordt gemeten, is een schakeling aanwezig, bestaande uit drie weerstanden R_{xn}, R_{yn} en R_{zn}, waarvan de waarden omgekeerd evenredig zijn met de waarden van resp. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$ bij die golflengte. Op elk der weerstanden wordt met behulp van een potentiometer R_{pn} en de accubatterij B_1 een spanning gezet die evenredig is met de gemeten waarde van $S(\lambda)$ (hiervoor kan de meter M, als voltmeter geschakeld, achtereenvolgens op alle potentiometers worden aangesloten). De stromen door deze weerstanden zijn dan evenredig met resp. $S(\lambda_n)\bar{x}(\lambda_n)$, $S(\lambda_n)\bar{y}(\lambda_n)$ en $S(\lambda_n)\bar{z}(\lambda_n)$. De som van de stromen door alle weerstanden R_{xn} is

$$\Sigma S(\lambda_n)\bar{x}(\lambda_n)$$

en is dus evenredig met X. Sommeren van de stromen door de weerstanden R_{yn} resp. R_{zn} levert resp. Y en Z, in dezelfde maat als X.

Bij het onderzoek aan „TL" lampen wordt behalve $S(\lambda)$ voor de genoemde golflengten ook de energie bij de golflengten van de vijf kwiklijnen gemeten. Het rekentoestel bevat ook voor deze golflengten schakelingen zoals hierboven zijn beschreven, in totaal dus 41.

Als alle 41 potentiometers op de juiste waarden zijn ingesteld, worden de drie stromen bepaald met een stroomcompensatieschakeling, bestaande uit de galvanometer G, de batterij B_2, de meter M (die nu als ampèremeter is geschakeld) en de regelbare weerstand R_1. De schakelaar S_1 wordt gesloten, S_2 geopend, en S_3 wordt eerst in stand X gezet. Met R_1 wordt nu de stroom door G op nul ingesteld, waarna wordt afgelezen op meter M. Op dezelfde wijze worden Y en Z bepaald met de schakelaar S_3 in stand Y en Z.

De schakelaar S_3 heeft de in fig. 3 getekende vorm gekregen om ervoor te zorgen dat zowel tijdens het instellen van de spanningen als tijdens het meten

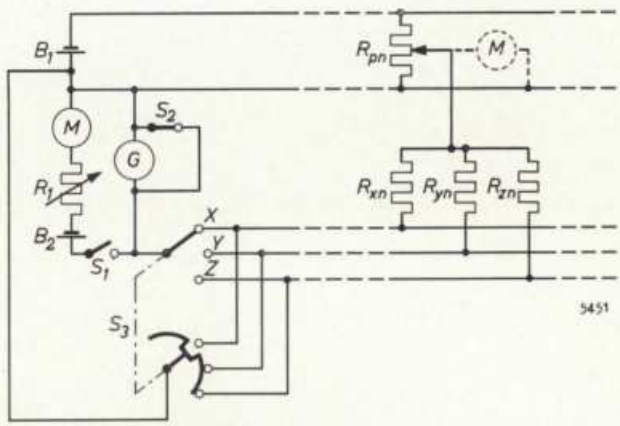


Fig. 3. Principeschema van de rekenmachine voor de bepaling van het kleurpunt van een lichtsoort.

van de stromen steeds alle weerstanden stroom doorlaten. Indien er telkens slechts door één der drie stellen weerstanden stroom zou lopen (van S_3 zou dan alleen de bovenste helft nodig zijn), zouden bij het omschakelen van S_3 de stromen door de potentiometers veranderen en zouden de spanningen opnieuw moeten worden ingesteld. Nu kan echter met één instelling voor de drie metingen worden volstaan. Het toestel is afgebeeld in *fig. 4*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

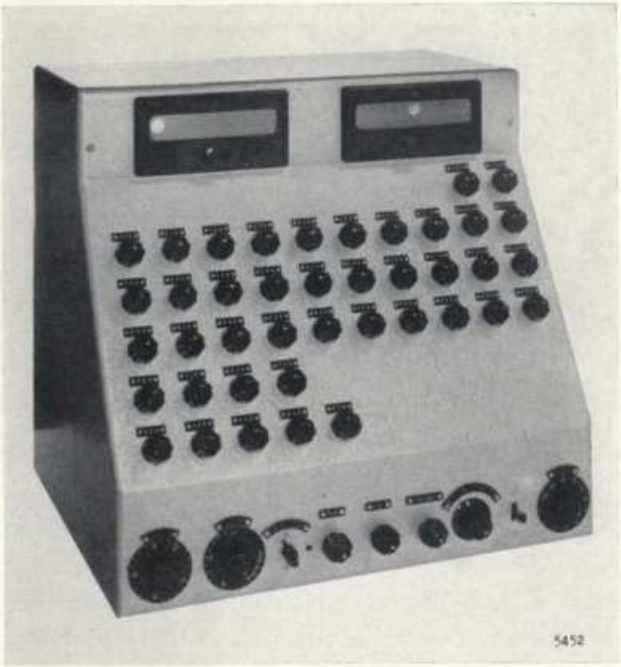


Fig. 4. De rekenmachine voor het bepalen van het kleurpunt. Op het schuine paneel bevinden zich de knoppen van de potentiometers, waarmee de gemeten energiewaarden worden ingesteld, links erboven de meter M uit fig. 3, en rechts de galvanometer G. Op de onderste rij zijn o.a. de regelweerstanden geplaatst voor het instellen van de stroomcompensatie.

Andere toepassingen van de rekenmachine

Behalve voor de bepaling van het kleurpunt kan de rekenmachine nog worden gebruikt voor vele andere berekeningen, waarbij een vermenigvuldiging met de kleurgevoeligheidsfuncties, of alleen met de ooggevoeligheidsfunctie $V(\lambda)$, moet worden uitgevoerd. Zo kan b.v. de verdeling van de lichtstroom over verschillende golflengtegebieden worden bepaald, door de gemeten waarden van de energieverdeling $S(\lambda)$ te vermenigvuldigen met de waarden van $V(\lambda)$ voor de desbetreffende golflengten, en deze produkten voor de gewenste golflengtegebieden op te tellen.

We behandelen nog het eveneens met het toestel uitvoerbare „normeren" van de tot dusver beschouwde relatieve spectrale energieverdeling $S(\lambda)$. Dit wordt gedaan, omdat men voor bestralingsdoeleinden (b.v. het bestralen van planten) is geïnteresseerd in de *absolute* grootte van de energiestroom die een lichtbron in een bepaald golflengtegebied op een oppervlak levert. Hiervoor moet men beschikken over een spectrale energieverdeling die voor het desbetreffende oppervlak de absolute waarden van de energiestromen geeft in plaats van de relatieve.

Om deze waarden te bepalen, zou men als volgt te werk kunnen gaan. Men meet de totale energiestroom P door het oppervlak en deelt deze door $\int S(\lambda)\mathrm{d}\lambda$ (deze integraal is evenredig met de totale energiestroom die bij het meten van $S(\lambda)$ door de fotometer is ontvangen). Vermenigvuldigt men nu de waarden van $S(\lambda)$ met deze factor $P/\int S(\lambda)\mathrm{d}\lambda$, dan heeft men de gevraagde absolute verdeling:

$$\frac{S(\lambda)}{\int S(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}\,P. \qquad \ldots\ldots \quad (3)$$

Men noemt $S(\lambda)/\int S(\lambda)\mathrm{d}\lambda$ de genormeerde verdeling. De absolute verdeling in een willekeurig vlak kan daaruit dus worden bepaald door de waarden te vermenigvuldigen met de gemeten totale energiestroom door het vlak.

In werkelijkheid voert men de normering nog iets anders uit. Het is nl. om praktische redenen gemakkelijker om de lichtstroom door een oppervlak te meten dan de energiestroom. De energieverdeling wordt daarom genormeerd door te delen door

$$K \int S(\lambda)\, V(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda. \qquad \ldots\ldots \quad (4)$$

(Deze integraal is evenredig met de totale lichtstroom die de fotometer bij het meten van $S(\lambda)$ heeft ontvangen; K is het fotometrisch stralingsequivalent, ca. 680 lumen/W.) De op deze wijze genormeerde energieverdeling is dan uitgedrukt in μW/lumen per 10 nm. De absolute verdeling wordt hieruit berekend door te vermenigvuldigen met de gemeten lichtstroom door het oppervlak.

Aangezien $V(\lambda)$ en $\bar{}(\lambda)$ identiek zijn, is de integraal uit (4) gelijk aan de integraal Y uit verg. (1) en kan dus op dezelfde wijze met het toestel worden bepaald. Omdat nu echter, anders dan bij de bepaling van het kleurpunt, de absolute waarde van Y wèl bekend moet zijn, is het toestel nog geijkt, door Y ermee te bepalen voor een energieverdeling waarvan deze grootheid bekend is. Voor dit doel hebben wij het spectrum van constante energie gebruikt, waarvoor Y op eenvoudige wijze kan worden berekend.

Samenvatting. Na een korte uiteenzetting over de C.I.E.-kleurendriehoek wordt een eenvoudige analogon-rekenmachine beschreven waarmee het kleurpunt van een lichtbron kan worden bepaald uit de relatieve spectrale energiewaarden $S(\lambda)$, gemeten bij een serie golflengten, opklimmend met 10 nm. Deze waarden van $S(\lambda)$ worden vermenigvuldigd met de overeenkomstige waarden van de internationaal vastgestelde kleurgevoeligheidsfuncties $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$ van het oog. Door optellen van resp. alle produkten $S(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ en $S(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ worden de grootheden X, Y en Z verkregen die de kleur karakteriseren. In de rekenmachine zijn voor elke golflengte waarbij $S(\lambda)$ is gemeten, drie weerstanden aanwezig, die waarden hebben evenredig met $1/\bar{x}(\lambda)$, $1/\bar{y}(\lambda)$ en $1/\bar{z}(\lambda)$. Op deze weerstanden wordt een spanning gezet die evenredig is met de gemeten waarde $S(\lambda)$. De stromen door de weerstanden zijn dan evenredig met de genoemde produkten. Ze worden in de schakeling gesommeerd. Met het toestel kunnen ook allerlei andere berekeningen van dit soort worden uitgevoerd, b.v. de normering van een relatieve spectrale energieverdeling.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

RESTGASONDERZOEK AAN TELEVISIEBEELDBUIZEN MET BEHULP VAN HET OMEGATRON

door J. van der WAAL *) en J. C. FRANCKEN *).

621.385.832.032.94:621.384.83

Het omegatron, in een nieuwe uitvoering die onlangs in dit tijdschrift is beschreven, is zeer geschikt voor de kwantitatieve analyse van gasresten. Dergelijke analysen hebben nuttige inlichtingen verschaft over processen die zich tijdens de fabricage en tijdens het gebruik afspelen in een televisiebeeldbuis.

Voor het goed functioneren van een televisiebeeldbuis is het noodzakelijk dat de totale gasdruk hierin minder dan 10^{-5} mm Hg (torr) bedraagt. Daarnaast worden ook nog eisen gesteld aan de samenstelling van dit restgas. Een bepaald gas kan een schadelijker invloed uitoefenen dan een ander. Vooral de levensduur van de katode in de beeldbuis kan sterk afhangen van de aanwezige soorten gas. De samenstelling van het gas in een gepompte en afgesmolten buis verandert voortdurend, doordat de verschillende onderdelen gassen afgeven en opnemen. Met een massaspectrometer kan men de gassamenstelling bepalen.

Daarbij is het belangrijk dat de gebruikte massaspectrometer een klein volume heeft en zo goed ontgast kan worden dat zijn eigen gasafgifte klein is ten opzichte van de gasafgifte van de beeldbuis. Een voor het doel zeer geschikte massaspectrometer is gevonden in het omegatron.

Reeds in 1953 zijn *kwalitatieve* onderzoekingen met het omegatron aan afgesmolten katodestraalbuizen verricht [1]). Zoals onlangs in dit tijdschrift is beschreven, is het omegatron nu ook geschikt gemaakt voor *kwantitatieve* metingen [2]). Van deze eigenschap is door ons gebruik gemaakt voor het restgasonderzoek aan televisiebeeldbuizen dat in dit artikel beschreven wordt. De werkingswijze van het omegatron is in laatstgenoemd artikel uitvoerig toegelicht. Wij zullen in het kort het principe herhalen.

Principe van het omegatron

Een ruimtelijk beeld van het omegatron in zijn eenvoudigste gedaante wordt gegeven in *fig. 1*. Elektronen uit een gloeikatode K lopen in een nauwe bundel evenwijdig met een homogeen magneetveld. Door botsing met de gasmoleculen worden ionen gevormd. Deze zullen, wanneer zij een snelheidscomponent loodrecht op de richting van het magneetveld bezitten, cirkelvormige banen om het statische magneetveld beschrijven. De stralen van deze banen worden gegeven door de vergelijking:

$$r = \frac{m}{e}\frac{v_0}{B}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Hierin is m de massa van het ion, e zijn elektrische lading, v_0 de snelheidscomponent loodrecht op de

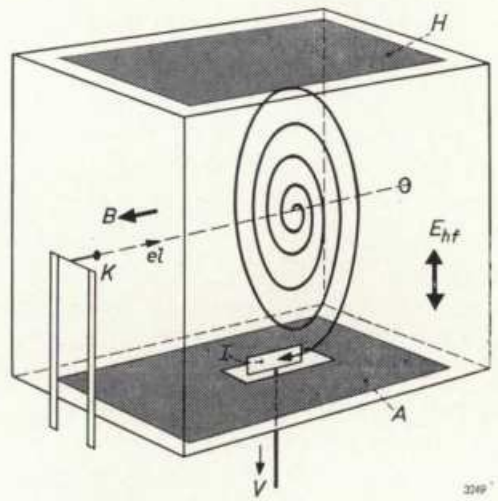


Fig. 1. Perspectivische tekening van een vereenvoudigd omegatron. B is de richting van de magnetische inductie, E_{hf} de richting van het hoogfrequente elektrische wisselveld. Een spiraalbaan van een ion is in de figuur getekend. K katode, die de ioniserende elektronenbundel *el* levert. A en H elektrodes voor de hoogfrequente spanning. I ionencollector. V aansluiting voor de versterker.

richting van het magneetveld en B de magnetische inductie. De hoekfrequentie ω_c van de omloop van het ion is:

$$\omega_c = \frac{e}{m} B, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

en de omloopperiode is dus onafhankelijk van de snelheid v_0. Loodrecht op de richting van het magneetveld legt men een hoogfrequent elektrisch

*) Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen, Eindhoven.
[1]) J. Peper, Philips techn. T. **19**, 266, 1957.
[2]) A. Klopfer en W. Schmidt, Philips techn. T. **22**, 199, 1960 (no. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wisselveld $\hat{E}_{hf} \sin \omega_0 t$ aan. Kiest men de hoekfrequentie ω_0 van dit veld gelijk aan de hoekfrequentie ω_c van een bepaald soort ionen, dan treedt resonantie op. De resonerende ionen zullen spiraalbanen gaan beschrijven, waarvan de straal steeds groter wordt. Door op een geschikte plaats een collector aan te brengen, kan men de resonerende ionen vangen. Met behulp van een gevoelige versterker kan men het aantal ionen dat per tijdseenheid gevangen wordt, de ionenstroom, meten.

Ionen die een andere massa maar dezelfde lading hebben als de resonerende ionen, d.w.z. in het algemeen die ionen die een andere waarde e/m bezitten, zullen door het elektrische wisselveld beurtelings worden versneld en vertraagd. De stralen van de door deze ionen beschreven banen nemen afwisselend toe en af. De maximale waarden van deze stralen blijven in het algemeen echter kleiner dan de afstand tussen de plaats waar de ionen ontstaan en de collector. Zij dragen derhalve niet bij tot de gemeten stroom. Om twee ionensoorten op deze wijze met zekerheid te scheiden, moet hun massaverschil Δm een bepaalde minimale waarde overschrijden. Men noemt $m/\Delta m$ het scheidend vermogen van de methode.

De druk van iedere component van het gasmengsel kan worden bepaald door de frequentie ω_0 van het elektrische wisselveld te variëren en de ionenstroom voor de verschillende massa's te meten. Wanneer de betrekking tussen ionenstroom en druk voldoende reproduceerbaar is, kan men voor iedere massa uit de ionenstroom de partiële gasdruk bepalen. Deze reproduceerbaarheid bestaat wanneer alle ionen die in resonantie zijn, op de collector vallen. Dit is slechts het geval wanneer de totale gasdruk in het omegatron minder dan 10^{-5} torr bedraagt: anders gaan er ionen door botsing met gasmoleculen verloren. Tevens mogen ionen die in resonantie zijn, niet op andere elektrodes terechtkomen. Door het aanbrengen van zijplaten en een geschikte keuze van de potentiaalverdeling binnen het omegatron kan men dit verwezenlijken, zoals in het aangehaalde artikel [2]) is beschreven. *Fig. 2* toont het gebruikte type omegatron met zijplaten.

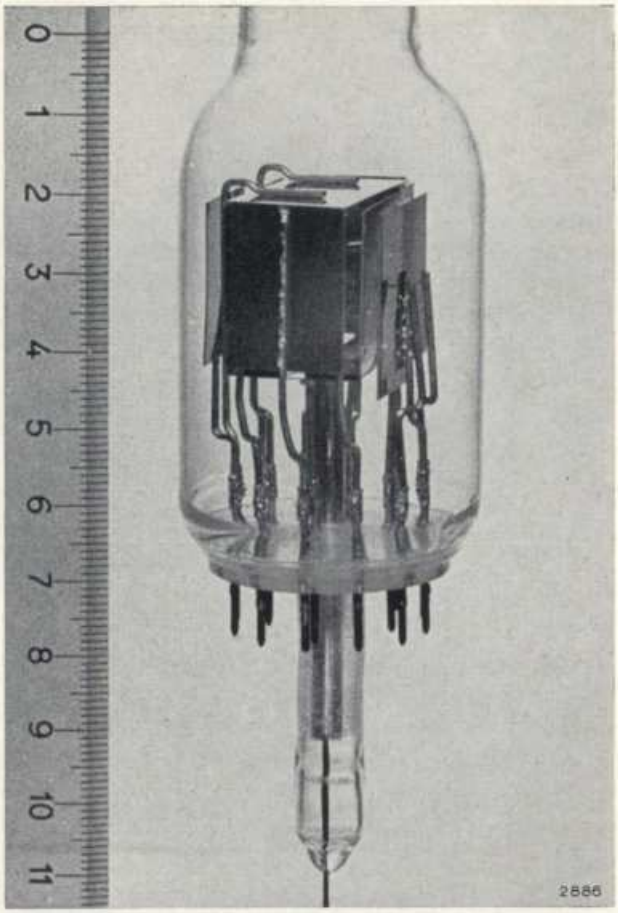


Fig. 2. Het omegatron met zijplaten in een glazen ballon. Rechts bevindt zich de gloeikatode, geheel links de trefplaat voor de elektronen die het omegatron hebben doorlopen. De ionen die in de ruimte binnen het omegatron worden gevormd, gaan naar de ionencollector. Deze is verbonden met de metalen pen die in de glazen buis is ingesmolten en aan de onderkant naar buiten steekt.

De meetopstelling

Bij alle hier te beschrijven experimenten is gebruik gemaakt van een permanente magneet met een magnetische inductie van 0,44 Wb/m². De gebruikte amplitude van de hoogfrequente elektrische spanning bedraagt 1 volt effectief. Deze spanning wordt geleverd door een Philips signaalgenerator van het type GM 2653. De elektronenstroom van het omegatron is gestabiliseerd. De ionenstroom wordt gemeten na versterking met een zeer stabiele tegengekoppelde gelijkstroomversterker [3]). De kleinste aantoonbare stroom bedraagt 10^{-14} A.

Het scheidend vermogen $m/\Delta m$ van het omegatron is sterk afhankelijk van de grootte van de magnetische inductie B, zoals blijkt uit de betrekking:

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{eB^2 S_0}{2\hat{E}_{hf} m}. \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

S_0 is de afstand van de plaats waar het ion gevormd wordt tot de ionencollector, $\hat{E}_{hf}$ de amplitude van het hoogfrequente elektrische wisselveld.

De formule voor het scheidend vermogen van het omegatron kan gemakkelijk worden afgeleid uit de formule die men in de literatuur vindt voor de straal r van de ionenbanen [4]):

$$r = \frac{\hat{E}_{hf}}{B\varepsilon} \sin \frac{\varepsilon}{2} t. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

[3]) J. Pelchowitch, Philips Res. Repts. **9**, 1, 1954.
[4]) H. Sommer, H. A. Thomas en J. A. Hipple, Phys. Rev. **82**, 697, 1951.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hierin is ε het verschil tussen de resonantiefrequentie ω_c van een ion met massa m en lading e en de frequentie ω_0 van het aangelegde hoogfrequente elektrische wisselveld: $\varepsilon = |\omega_0 - \omega_c|$. Aangenomen is dat $\varepsilon \ll \omega_c$. De ionen kunnen niet buiten een cirkel komen met straal

$$r_{max} = \hat{E}_{hf}/B\varepsilon . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Indien $\varepsilon \leqslant \hat{E}_{hf}/BS_0$, is $r_{max} \geqslant S_0$ en kunnen ionen met een resonantiefrequentie ω_0 op de ionencollector vallen, alhoewel de frequentie van het wisselveld ω_0 afwijkt van ω_c. Is $\varepsilon > \hat{E}_{hf}/BS_0$, dan vallen deze ionen niet op de collector. Hieruit volgt dat men de frequentie van het wisselveld met 2ε kan variëren, terwijl toch ionen met een resonantiefrequentie ω_c op de collector blijven vallen. Bij een zekere massa m zal nog juist een massa $m + \Delta m$ volledig hiervan gescheiden kunnen worden wanneer het verschil $\Delta\omega_c$ van de bijbehorende resonantiefrequenties van de twee massa's gelijk is aan 2ε.

Het scheidend vermogen kunnen wij nu schrijven als:

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{\omega_c}{\Delta\omega_c} = \frac{\omega_c}{2\varepsilon} = \frac{eB^2S_0}{2\hat{E}_{hf}m} . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Voor de gebruikte meetopstelling is het scheidend vermogen theoretisch, d.i. volgens de formule, zodanig dat twee ionensoorten met massaverschil $\Delta m = 1$ nog volledig gescheiden kunnen worden indien het massagetal $m = 34$. In werkelijkheid blijkt dit voor de opstelling het geval te zijn tot $m = 23$. Om het scheidend vermogen te verbeteren, beschikken wij sinds kort over een permanente magneet met een magnetische inductie $B = 0{,}92$ Wb/m². *Fig. 3* laat deze magneet zien samen met de andere apparatuur van de meetopstelling. Een instelbaar juk houdt de

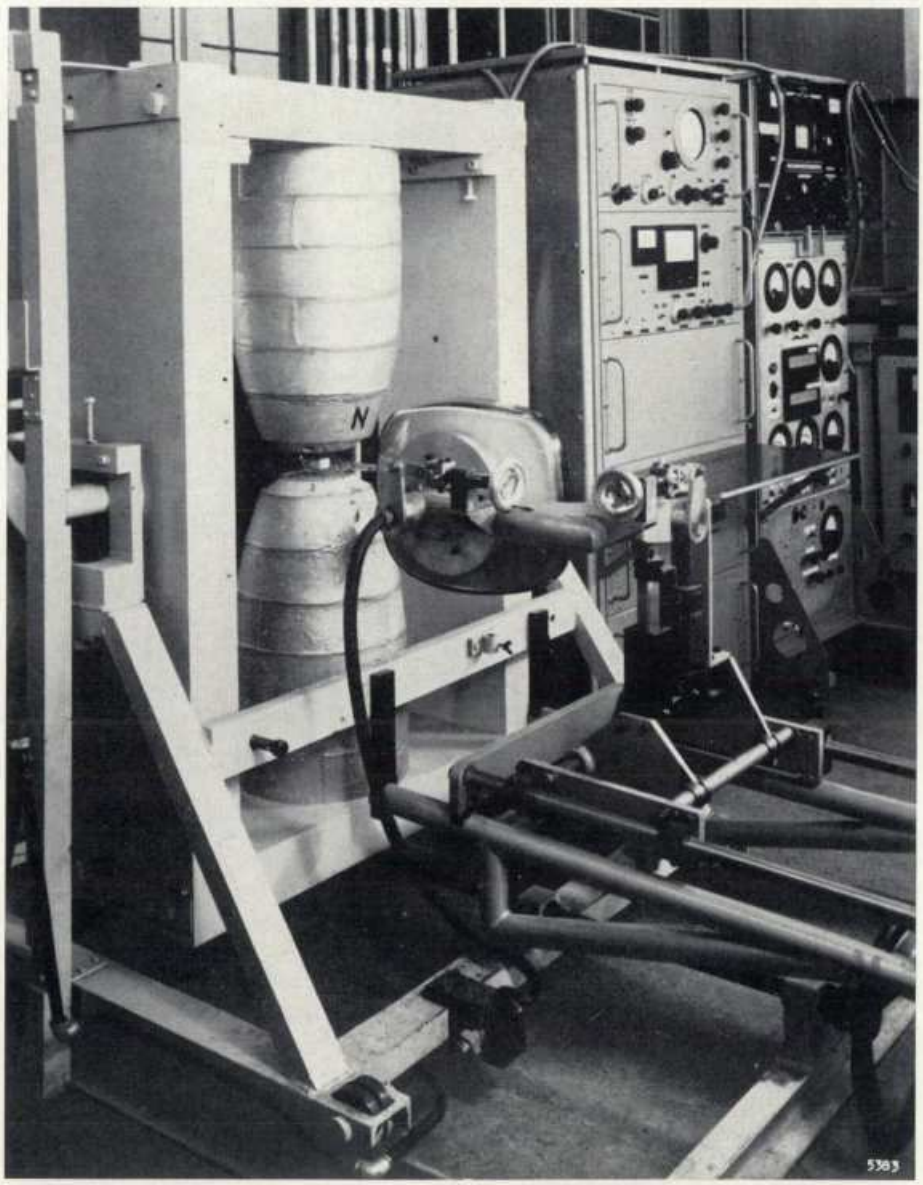


Fig. 3. Meetopstelling, bestaande uit een permanente magneet met een magnetische inductie $B = 0{,}92$ Wb/m², een gelijkstroomversterker voor de ionenstroom, de Philips signaalgenerator GM 2653 die de hoogfrequente elektrische wisselspanning levert, alsmede hulpapparatuur voor de andere spanningen die voor het omegatron nodig zijn. De televisiebeeldbuis waaraan de samenstelling van het restgas gemeten wordt, is verbonden met een omegatron dat zich tussen de poolschoenen van de magneet bevindt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

te analyseren beeldbuis vast. De poolafstand van de magneet is 5,0 cm, terwijl de diameter van de poolschoenen 13,0 cm bedraagt. Op een afstand van 2,0 cm uit het midden is de variatie in de magnetische inductie nog maar $1^0/_{00}$. Theoretisch is het scheidend vermogen nu zodanig dat tot massagetal $m = 73$ het verschil $\Delta m = 1$ voldoende is voor een volledige scheiding. Experimenteel vindt men dit tot $m = 49$. Dit betekent dat men het gas propaan (C_3H_8, massagetal 44) met de kleine magneet niet, maar met de grote magneet wel volledig van zijn „buren" kan scheiden. *Fig. 4* is het spectrum van een gasmengsel dat naast propaan een

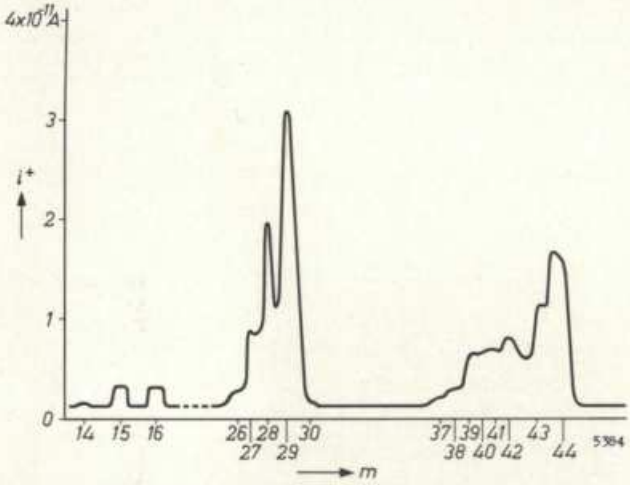


Fig. 4. De ionenstroom i^+ van het omegatron als functie van het ingestelde massagetal m, bij onderzoek van een televisiebeeldbuis. In de buis bevindt zich propaan C_3H_8 met een geringe hoeveelheid methaan CH_4. De hoogfrequente elektrische wisselspanning bedraagt 1 volt. Dit spectrum is opgenomen met de magneet met een magnetische inductie $B = 0{,}44$ Wb/m².

verontreiniging met methaan bevat, opgenomen met de magneet met een inductie $B = 0{,}44$ Wb/m². *Fig. 5* toont hetzelfde spectrum, maar nu met een inductie $B = 0{,}92$ Wb/m² opgenomen. De verbetering in het scheidend vermogen is vooral voor de massagetallen 43 en 44 goed te zien.

Gasanalyses aan beeldbuizen in verschillende stadia van de constructie

Bij de fabricage van beeldbuizen is het niet alleen van belang de samenstelling van het restgas in de complete buis te kennen. Men wil graag weten welke buisonderdelen het meest bijdragen tot het restgas, en welke gassen dit zijn. Daartoe bestudeert men buizen die incompleet zijn, d.w.z. dat er b.v. geen fluorescerend scherm en/of geen metalen onderdelen zijn aangebracht. Bovendien doet men de analyse na de verschillende bewerkingsfazen die op het afsmelten volgen.

Aan alle onderzochte buizen is een omegatron aan de zijkant van de buis vlak bij het scherm bevestigd. Allereerst wordt de glazen ballon van een beeldbuis onderzocht die uitsluitend een niet verdampte bariumgetter bevat. Alle andere „normale" onderdelen, zoals fluorescerend scherm en elektronenkanon, ontbreken derhalve. Deze ballon, waaraan naast het omegatron nog een Philips ionisatiemanometer van het type 53 EM [5]) is gesmolten, heeft als enige bewerking een pompproces ondergaan dat bestaat uit 2 uur pompen met een oliediffusiepomp. Tijdens het pompen bevindt de buis zich 20 minuten op 400 °C. Vlak na dit pompproces wordt de buis afgesmolten. Men neemt aan dat zich 20 uur na het afsmelten vrijwel een evenwichtstoestand heeft ingesteld. Op dat tijdstip wordt de gassamenstelling met het omegatron gemeten. Men treft dan waterstof, stikstof, methaan, waterdamp, koolmonoxyde en kooldioxyde aan. Vervolgens wordt de getter verdampt en wederom een meting verricht. De chemisch actieve gassen zijn dan door de getterspiegel opgenomen. In plaats daarvan bevat de buis nu veel koolwaterstoffen, die waarschijnlijk zijn ontstaan door reacties tussen waterdamp en koolstof uit de getter. De getter neemt deze koolwaterstoffen niet op. Ook meet men een zekere hoeveelheid argon afkomstig van de getter. Tijdens de fabricage van de bariumgetter is dit argon in het gettermateriaal opgenomen. Vervolgens wordt gedurende 15 minuten met de ionisatiemanometer gepompt. De pompwerking berust op twee verschijnselen. Op de eerste plaats worden aan de hete

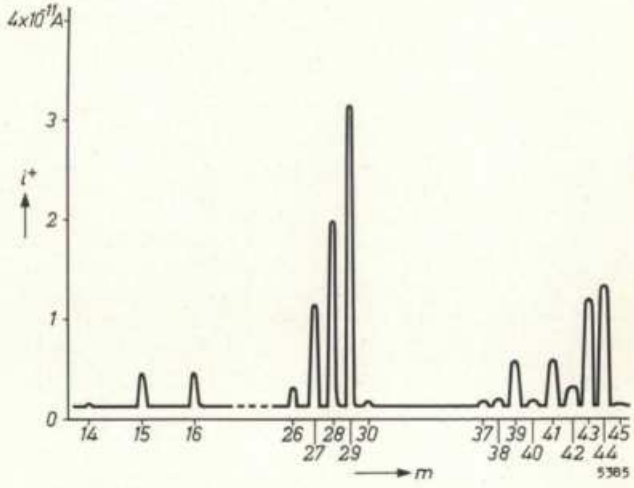


Fig. 5. Hetzelfde massaspectrum als in fig. 4, maar nu opgenomen met de magneet met een magnetische inductie $B = 0{,}92$ Wb/m². Alle spanningen aan het omegatron zijn dezelfde als in de vorige meting. Het scheidend vermogen is aanzienlijk verbeterd.

[5]) E. Bouwmeester en N. Warmoltz, Philips techn. T. **17**, 96, 1955.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gloeidraad, die zich op een temperatuur tussen 1500° en 2000 °C bevindt, de koolwaterstoffen afgebroken. De brokstukken worden door de getter gebonden, zodat de druk verlaagd wordt. Op de tweede plaats ontstaan ten gevolge van de elektronenstroom van 2,5 mA in het gas ionen, die door de collector worden gevangen en zodoende uit het gas verwijderd. Ook dit effect draagt bij tot de drukverlaging. Na de genoemde 15 minuten wordt de ionisatiemanometer uitgeschakeld en laat men de beeldbuis gedurende 14 dagen staan zonder dat enige bewerking wordt uitgevoerd. Na deze periode blijkt de druk maar weinig te zijn toegenomen.

In *fig. 6* worden de resultaten vergeleken voor de gevallen dat de getter tijdens het pompproces niet (linkerkolom) of wel (rechterkolom) wordt vóór-ontgast, op vier verschillende tijdstippen: *a*) vóór en *b*) na het verdampen van de getter, *c*) na 15 minuten stroom trekken met de ionisatiemanometer, en *d*) na 14 dagen. Aanvankelijk blijkt de druk lager te zijn indien de getter voorontgast is, maar na 14 dagen is er geen verschil meer te constateren tussen ballons met wel en niet voorontgaste getter.

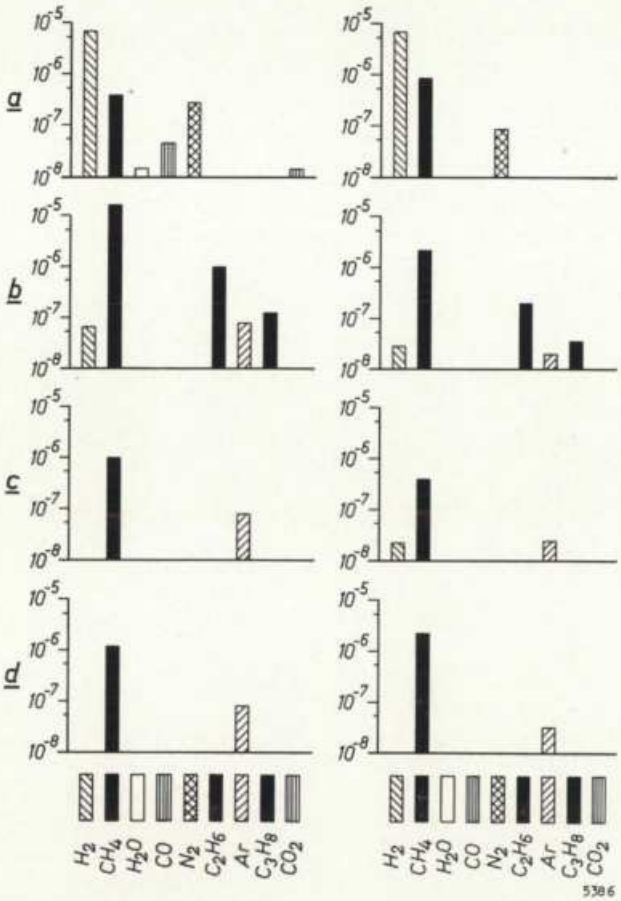


Fig. 6. De samenstelling van het restgas in niet bewerkte glazen ballons van televisiebeeldbuizen. *a*) Vóór het verdampen van de aanwezige bariumgetter; *b*) na het verdampen van de getter; *c*) na 15 minuten lang een elektronenstroom van 2,5 mA in de ionisatiemanometer Philips 53 EM getrokken te hebben; *d*) 14 dagen na deze laatste bewerking. De linkerkolom geldt voor het geval dat de getter *niet* is voorontgast; de rechterkolom voor het geval dat hij *wel* is voorontgast. Schaal voor de partiële drukken in torr (mm Hg), eveneens in volgende figuren.

Fig. 7 geeft een vergelijking tussen vier verschillende ballons op verschillende tijdstippen van de bewerking zonder dat de getter verdampt is. De eerste ballon (*a*) heeft, zoals in het vorige geval, geen enkele bewerking ondergaan. De tweede (*b*) is reeds voorzien van een fluorescerend scherm, in de derde ballon (*c*) is ook de elektrisch geleidende laag van aluminium over dit scherm aangebracht. De laatste ballon (*d*) bevat tevens het elektronenkanon. De katode van dit kanon is ontleed en geactiveerd toen de ballon nog met de oliediffusiepomp verbonden was. Deze laatste ballon vormt de complete beeldbuis. Deze vier ballons werden alle volgens het genoemde pompproces behandeld. 20 uur na het afsmelten werd de gassamenstelling met behulp van het aangesmolten omegatron bepaald. Opvallend is de lagere waterstofdruk en de hogere stikstof- en argondruk in de tweede ballon. De waterstof is waarschijnlijk door het scherm opgenomen, terwijl de hogere stikstof- en argondruk vermoedelijk een gevolg zijn van opneming van deze gassen uit de atmosfeer tijdens het vervaardigen van het scherm. Ballon *c* wijkt nagenoeg niet van ballon *b* af, maar de complete buis met het elektronenkanon heeft een lagere stikstofdruk en een hogere koolmonoxydedruk. Ook de kooldioxydedruk is toegenomen, waarschijnlijk ten gevolge van de gasafgifte door de oxydekatode.

Na het verdampen van de getter in de complete buis verandert de gassamenstelling radicaal en bestaat het restgas in de meeste buizen uitsluitend uit methaan en argon. Andere koolwaterstoffen, echter met een veel lagere druk dan methaan, zijn in sommige buizen ook nog aanwezig.

In *fig. 8* is te zien hoe de samenstelling van het restgas in een complete beeldbuis verandert tijdens gebruik. 20 uur na het afsmelten van de buis wordt met de meting begonnen (*a*). Wanneer de katode op temperatuur wordt gebracht, verandert er nog niet veel, maar zodra het scherm wordt gebombardeerd met een elektronenbundel die een raster schrijft, nemen de stikstof- en waterstofdruk toe, terwijl de koolwaterstoffen geheel verdwijnen (*b*). Nadat het scherm 250 uur lang met een elektronenstroom van 275 μA — de elektronen hebben een energie van 16 keV — is gebombardeerd, blijken de waterstof- en stikstofdruk gemeten tijdens het bombardement afgenomen te zijn (*c*). Wanneer het bombardement wordt stopgezet, vindt men nog uitsluitend argon in de complete buis (*d*). De pompsnelheid van de getterspiegel is blijkbaar niet groot

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

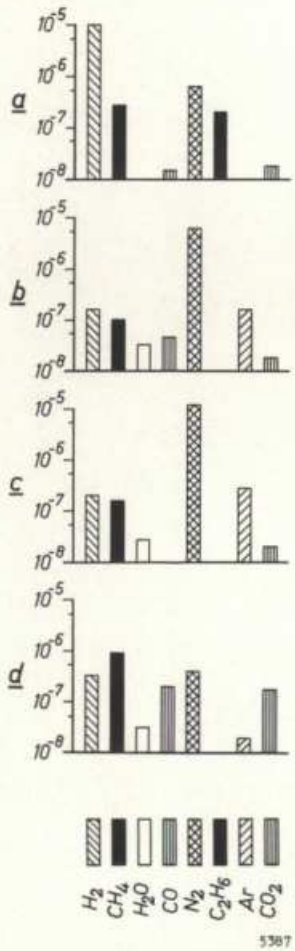


Fig. 7

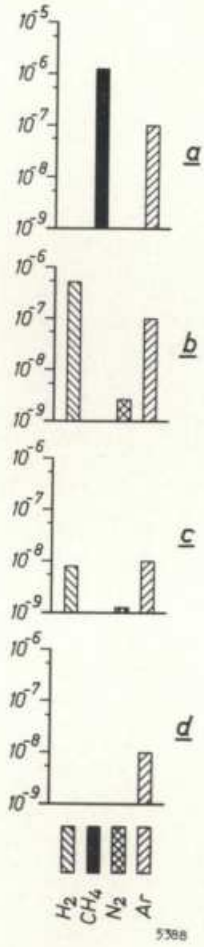


Fig. 8

Fig. 7. De samenstelling van het restgas in beeldbuizen op verschillende tijdstippen van de bewerking. *a*) Een niet bewerkte glazen ballon; *b*) een ballon met fluorescerend scherm; *c*) een ballon met fluorescerend scherm en geleidende laag van aluminium; *d*) een complete buis met elektronenkanon. In geen van de ballons was een getter verdampt.

Fig. 8. De samenstelling van het restgas in een complete beeldbuis op vier tijdstippen. *a*) 20 uur na het afsmelten, met koude katode; als de katode op temperatuur wordt gebracht, verandert er nog niet veel; *b*) gedurende het eerste uur van schermbombardement; *c*) na 250 uur schermbombardement, gedurende het bombardement gemeten; *d*) onmiddellijk na het uitschakelen van de buis.

genoeg om in het begin de grote waterstof- en stikstofproduktie aan het scherm op te vangen, maar op de lange duur wordt alle waterstof en stikstof door de getterspiegel opgenomen. Op de zeer snelle afneming van de hoeveelheid koolwaterstoffen bij het begin van het schermbombardement komen wij later in dit artikel nog terug.

Het openbreken van beeldbuizen onder vacuüm

In het voorgaande hebben wij gezien hoe de samenstelling van het restgas in beeldbuizen en de verandering daarvan tijdens de fabricage kan worden bepaald door *vooraf* een omegatron aan de buis te smelten. Het kan echter voorkomen dat een buis uit de normale fabricage niet goed functioneert, doordat de gasdruk te hoog is. Men wil in zo'n geval graag vaststellen welk gas hiervoor verantwoordelijk is. Men zal dan de, reeds gepompte, afgekeurde buis alsnog willen verbinden met een omegatron.

Men gaat daartoe op de volgende wijze te werk. Allereerst wordt met behulp van een ultrasone boormachine een gat met een middellijn van 5 mm geboord in de hals bij het elektronenkanon van de te analyseren buis [6]). Men boort zo diep dat de dikte van de glaswand nog slechts 0,5 mm bedraagt. Met behulp van epoxycement wordt een glazen buisje op de rand van het geboorde gat gekit. Het glazen buisje is verbonden met een pompopstelling en een omegatron, terwijl tevens in het buisje een metalen gewichtje is aangebracht. Door een half uur op ongeveer 100 °C te verhitten, laat men het cement harden, waarna een sterke en vacuümdichte verbinding is ontstaan. Het gewichtje, dat met behulp van een magneet verplaatsbaar is en voorzien is van een stalen punt, kan op een geschikt tijdstip het contact tussen beeldbuis en omegatron tot stand brengen door de resterende dunne glaswand van het boorgat te doorbreken. *Fig. 9* geeft schematisch een beeld van de gehele opstelling. Het gedeelte dat in de figuur binnen de stippellijnen valt, wordt, voordat de verbinding tot stand gebracht wordt, gedurende 15 uur bij een temperatuur van 400 °C ontgast. Tegelijkertijd wordt het glazen verbindingsbuisje door middel van verwarmingsdraden tot 200 °C verhit. Het epoxycement wordt daarbij niet warmer dan 100 °C, de beeldbuis blijft in zijn geheel op kamertemperatuur. Na 15 uur pompen met de diffusiepomp en ontgassen is de druk gedaald tot een waarde tussen 1×10^{-8} en 5×10^{-8} torr. Het restgas bestaat dan uit waterstof, stikstof, kooldioxyde en soms wat waterdamp.

De hoogvacuümkraan K_1 wordt na afkoelen van het systeem tot kamertemperatuur gesloten. Deze kraan is een glazen kraan zonder vet en wordt gesloten met behulp van een magneetje. Nadat met behulp van het gewichtje de glazen wand tussen de opstelling en de beeldbuis is doorbroken, kan de gasinhoud van de beeldbuis met het omegatron worden geanalyseerd.

Het zal duidelijk zijn dat deze methode alleen zin heeft indien de gasafgifte van het epoxycement gering is. In dezelfde opstelling zonder epoxycement, waarbij het uiteinde van het glazen buisje wordt dichtgesmolten, bereikt men gemakkelijk een druk van 10^{-9} torr. Het restgas bestaat dan voornamelijk uit stikstof. De lagere druk moet derhalve geheel aan het ontbreken van de gasafgifte van het epoxycement worden toegeschreven. Wanneer de druk in de beeldbuis veel hoger is

[6]) R. H. Collins en J. C. Turnbull, Vacuum **10**, 27, 1960 (no. 1/2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

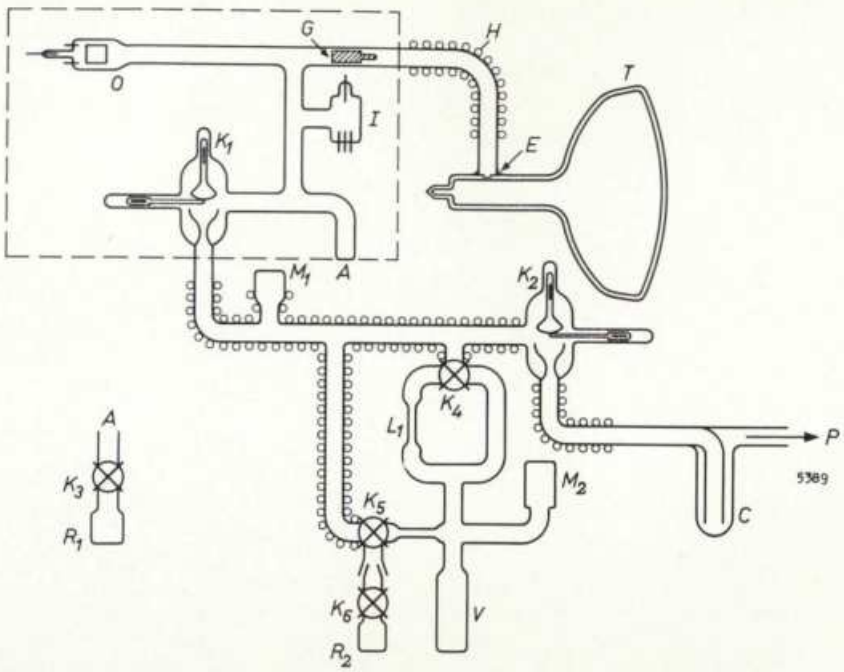


Fig. 9. Opstelling voor het openbreken van een televisiebeeldbuis en het analyseren van het restgas. Op een bijna doorgeboord gat in de hals van de beeldbuis T is door middel van epoxycement E een glazen buisje aangebracht, dat door de verhittingsspiraal H kan worden ontgast. Het gedeelte van de opstelling binnen de stippellijn kan in een oven op 400 °C worden ontgast. Dit gedeelte omvat het omegatron O, de ionisatiemanometer I, het gewichtje G en de glazen hoogvacuümkraan K_1. M_1 penningmanometer. K_2 tweede hoogvacuümkraan. K_4-K_6 vetkranen. M_2 piranimanometer. R_2 reservoir met koolmonoxyde. V expansievolume van 5,2 l. C vloeibare-stikstofkoeler. L_1 capillair. Bij P is de kwikdiffusiepomp aangesloten. Op het punt A kan het regelventiel K_3 met het reservoir R_1, dat gevuld is met methaan, worden aangesloten.

dan 5×10^{-8} torr, wat in de praktijk altijd het geval is, is deze meetmethode derhalve toelaatbaar.

Vergelijkt men de samenstelling van het restgas gemeten met een aan de ballon bevestigd omegatron vóór het openbreken met de samenstelling zoals die gemeten wordt na het openbreken van deze ballon, dan vindt men een heel behoorlijke overeenstemming. Alleen voor water en kooldioxyde vindt men na het openbreken kleinere drukken, omdat deze gassen dan geadsorbeerd kunnen worden aan de goed ontgaste onderdelen van de pompopstelling.

Fig. 10 laat de samenstelling van het restgas zien in twee afgekeurde beeldbuizen die een te hoge gasdruk

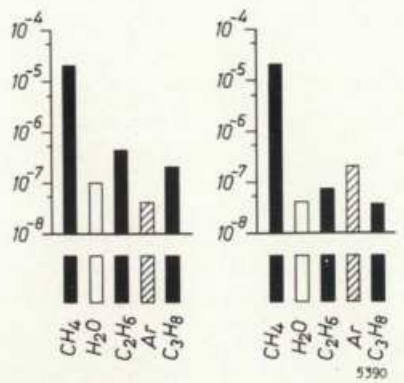


Fig. 10. De samenstelling van het restgas in twee beeldbuizen uit de normale fabricage die afgekeurd zijn wegens te hoge druk.

bleken te hebben en die op de beschreven wijze opengebroken zijn. In deze buizen kwamen koolwaterstoffen, water en argon voor. De koolwaterstoffen zijn waarschijnlijk ontstaan door reacties tussen water en koolstofverbindingen in de getterspiegel [7]). In andere beeldbuizen bleek de te hoge druk soms te moeten worden toegeschreven aan argon. Deze laatste buizen bleken niet lek te zijn, zoals kon worden vastgesteld door de gehele buis geruime tijd te bewaren in een plastieken zak, gevuld met helium. Het omegatron gaf dan geen hogere heliumdruk te zien. Het is waarschijnlijk dat *tijdens het pompproces* lucht in deze buizen is gekomen. De chemisch actieve gassen worden nog door de getterspiegel opgenomen, het edelgas argon echter niet.

De rest van de opstelling, zoals deze in fig. 9 schematisch is weergegeven, dient om de gettercapaciteit van de bariumgetter van de beeldbuis te onderzoeken [8]). Voor deze meting sluit men K_2 en opent men K_1. Koolmonoxyde wordt vanuit een

[7]) F. H. R. Almer, H. J. R. Perdijk en P. G. van Zanten, Advances in vacuum science and technology, Proc. 1st int. congress on vacuum techniques, Namen, 10-13 juni 1958, deel 2, blz. 676, Pergamon Press, Oxford 1960.

[8]) J. J. B. Fransen en H. J. R. Perdijk, Philips techn. T. **19**, 308, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

reservoir in een bekend volume V van 5,2 l toegelaten. De druk p_2 in V wordt gemeten met een piranimanometer, die speciaal voor koolmonoxyde is geijkt. Een bekende hoeveelheid gas kan op deze wijze tot de getterspiegel worden toegelaten. De pompsnelheid S van de getter kan dan worden afgeleid uit de bekende betrekking:

$$S = L\frac{p_2 - p_1}{p_1}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

p_1 is de koolmonoxydedruk in de beeldbuis en L de geleiding tussen reservoir en televisiebeeldbuis. Deze geleiding wordt vrijwel geheel bepaald door het capillair L_1. De druk p_1 in de beeldbuis kan worden gemeten door het elektronenkanon van de beeldbuis zelf als ionisatiemanometer te gebruiken [9]). In *fig. 11* is aangegeven op welke wijze men daartoe te werk gaat. De katode wordt op aardpotentiaal gehouden. Met het eerste negatieve rooster stuurt men de elektronenstroom naar het tweede rooster, dat een potentiaal van +300 volt ten opzichte van de katode bezit. Aan alle overige elektrodes wordt

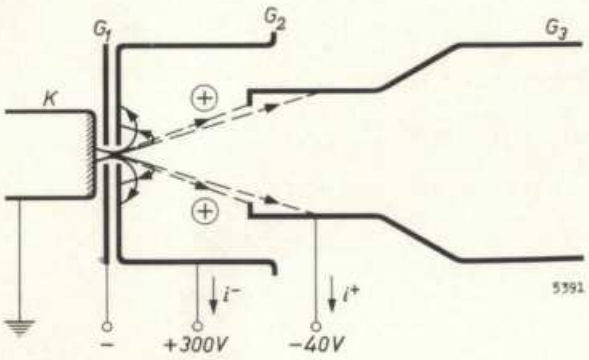


Fig. 11. Het meten van de druk in een beeldbuis door het elektronenkanon van de buis zelf als ionisatiemanometer te gebruiken. K katode op aardpotentiaal. G_1 rooster negatief ten opzichte van aarde. G_2 positief rooster, dat de elektronen verzamelt. Met G_3 meet men de ionenstroom, die een maat is voor de druk.

een potentiaal van —40 volt ten opzichte van de katode gegeven. Met deze elektrodes meet men de ionenstroom, die in dit geval een maat is voor de druk.

De totale hoeveelheid koolmonoxyde die de getterspiegel in een beeldbuis kan opnemen, hangt af van de verdampte hoeveelheid gettermateriaal. Een representatieve waarde is 1 torrliter wanneer 45 mg barium wordt verdampt in een beeldbuis met een schermdiagonaal van 53 cm.

Behalve beeldbuizen kunnen ook allerlei andere elektronenbuizen op deze wijze worden opengebroken en onderzocht. Wij denken aan b.v. oscillograafbuizen, zendbuizen en televisie-opneembuizen zoals vidicons en beeldorthicons. In het algemeen kan men zeggen dat iedere elektronenbuis op deze wijze onderzocht kan worden, mits de hoeveelheid gas in de buis meer dan 10^{-7} torrliter bedraagt.

Een voorbeeld van metingen aan het laatstgenoemde type buis ziet men in *fig. 12*. Hierbij werd

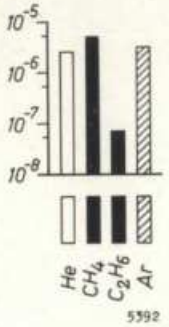


Fig. 12. De samenstelling van het restgas in een beeldorthicon vier maanden na de fabricage. Opvallend is de hoge heliumdruk.

de gassamenstelling in een beeldorthicon 4 maanden na de fabricage gemeten. Het restgas bestond uit methaan, ethaan en argon dat uit de bariumgetter is gekomen. Tevens meet men een partiële heliumdruk van 2×10^{-6} torr. Dit helium is uit de atmosfeer door de glaswand naar binnen gediffundeerd. De hoeveelheid helium Q die bij een overdruk Δp per tijdseenheid door een glaswand met oppervlakte A en dikte d diffundeert, wordt gegeven door:

$$Q = \frac{K A \Delta p}{d}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Hierin is K de permeabiliteit voor helium van het gebruikte borosilicaatglas, waarvoor geldt [10]):

$$K = 1{,}5\times10^{-13}\,\frac{\text{torrliter}\times\text{mm (dikte glaswand)}}{\text{cm}^2(\text{oppervl.})\times\text{sec}\times\text{torr (heliumdrukverschil)}}.$$

In het geval van de beeldorthicon was $A = 600$ cm², $\Delta p = 3\times10^{-3}$ torr, de gemiddelde wanddikte $d = 2{,}2$ mm. Het volume van de orthicon bedraagt 740 cm³, zodat men een drukstijging na 4 maanden berekent van $1{,}9\times10^{-6}$ torr. Dit stemt uitstekend overeen met de gemeten heliumdruk van 2×10^{-6} torr.

De afbraak van koolwaterstoffen tijdens het gebruik van een beeldbuis

Gebruikt men het elektronenkanon van een beeldbuis op de beschreven wijze voor het bepalen van de druk, dan blijken de partiële drukken van de koolwaterstoffen, gemeten met het omegatron, snel af te nemen. Dit komt door afbraak van de koolwaterstoffen aan de hete katode van de beeldbuis, die zich

[9]) J. de Gier, Ingenieur **65**, O 36, 1953.

[10]) A. Klopfer en W. Ermrich, Vacuum **10**, 128, 1960 (no. 1/2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

op een temperatuur van 800 °C bevindt, en de daarop volgende opneming van de brokstukken door de getterspiegel. Bovendien ontstaan er door botsing van elektronen met gasmoleculen ionen die door negatieve elektrodes worden gevangen. Beide mechanismen dragen bij tot een drukverlaging van koolwaterstoffen. *Fig. 13* toont de afneming van de partiële drukken van verschillende koolwaterstoffen

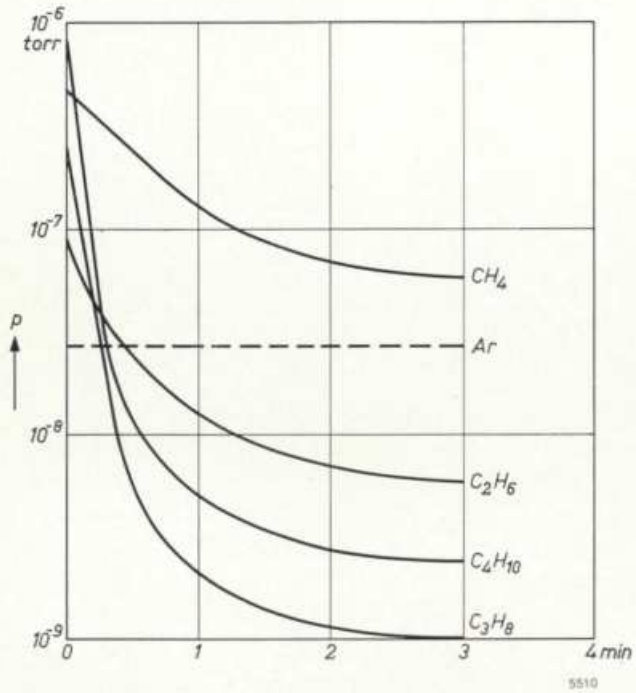


Fig. 13. De daling van de partiële koolwaterstofdrukken in een beeldbuis. De druk is logaritmisch uitgezet tegen de tijd in minuten. De elektronenstroom is 400 μA. Het elektronenkanon van de buis zelf fungeert als ionisatiemanometer.

in dit geval. De zwaardere koolwaterstofmoleculen worden gemakkelijker afgebroken dan de lichte, zodat de drukken voor deze moleculen sneller afnemen dan b.v. het lichte methaan. Met behulp van de bekende formule:

$$V\frac{dp}{dt} = -Sp\,, \qquad \ldots\ldots \quad (9)$$

waarin V het volume, p de druk, dp/dt de drukverandering per tijdseenheid en S de pompsnelheid voorstelt, kan men deze laatste bepalen. Immers, uit deze formule volgt na integratie:

$$\ln\frac{p}{p_0} = -\frac{S}{V}t + C\,. \qquad \ldots\ldots \quad (10)$$

Door de druk logaritmisch tegen de tijd uit te zetten, vindt men uit de helling van de kromme de pompsnelheid. Voor methaan is de pompsnelheid tijdens een dergelijke drukmeting ongeveer 0,004 l/s.

Veel groter is de pompsnelheid voor de koolwaterstoffen tijdens normaal werken van de buis, waarbij elektronen met een energie van 16 keV het scherm bombarderen. De pompsnelheid is zo groot dat deze niet verklaard kan worden door de grotere weglengte van de elektronen door de buis en het daarmee samenhangende grotere aantal gevormde ionen. Het aantal gevormde ionen neemt niet eens lineair met de grotere weglengte van de elektronen toe, doordat de elektronen nu een grotere energie en daarmee een kleinere ionisatiekans bezitten dan in het geval dat het elektronenkanon als ionisatiemanometer wordt gebruikt. De grote pompsnelheid voor koolwaterstoffen blijkt dan ook te danken te zijn aan het *fluorescerende scherm* van de buis. Dit wordt zeer duidelijk gedemonstreerd in *fig. 14*, waar het drukverloop van methaan logaritmisch is uitgezet als functie van de tijd vanaf het begin van het schermbombardement, voor een complete buis en voor een buis waarin het fluorescerend scherm ontbrak, maar de geleidende laag aluminium wel aanwezig was. In de buis met alleen de geleidende laag aluminium is de pompsnelheid voor methaan wederom 0,004 l/s, in de complete buis bedraagt zij 2 l/s. Op dezelfde wijze kon door vergelijking van twee buizen waarvan bij de één het fluorescerend scherm met en bij de ander zonder silicaatbinder was aangebracht, nog nader worden vastgesteld dat de silicaatbinder verantwoordelijk is voor de grote pompsnelheid van de

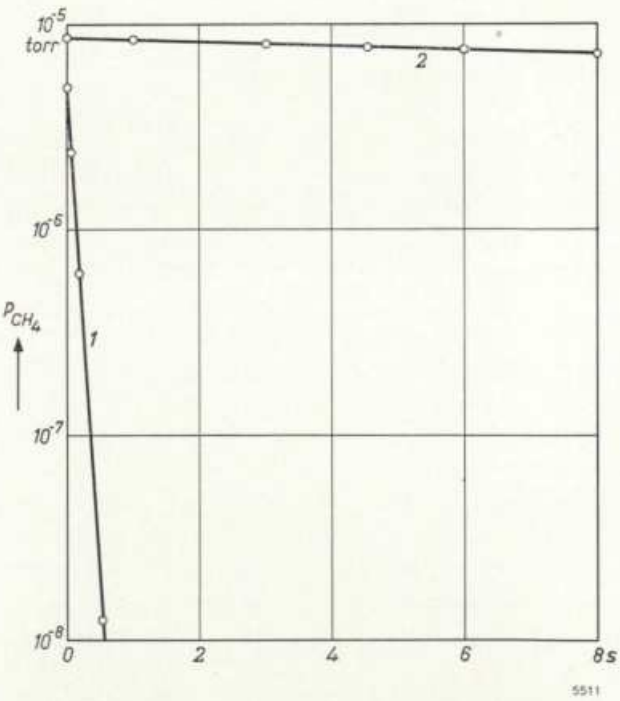


Fig. 14. De adsorptie van methaan tijdens bombardement van het scherm, bij een complete beeldbuis (*1*) en bij een buis zonder fluorescerend scherm (*2*). Uit de hellingen van de twee rechten volgen constante pompsnelheden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

koolwaterstoffen. De vorm waarin de silicaatbinder aanwezig is na het prepareren van het scherm, lijkt veel op die van silicagel. Dit is een stof die een groot inwendig oppervlak heeft en gemakkelijk grote hoeveelheden gas kan adsorberen.

Dat het fluorescerende scherm verantwoordelijk is voor het pompeffect, blijkt nog eens duidelijk uit de invloed van de versnellende spanning. Pas bij 1,5 kV begint het pompeffect, d.i. bij dezelfde spanning waarbij de elektronen door de aluminiumlaag heen kunnen dringen tot in de fosforlaag. Tot 4 kV neemt de pompsnelheid nog toe, boven deze waarde is hij onafhankelijk van de spanning.

Een reeks proeven is gedaan om een beter inzicht te krijgen in het mechanisme van dit pompeffect. Een complete beeldbuis, voorzien van een aangesmolten glazen buisje, voorlopig afgesmolten door een dunwandig bolletje (bolcapillair), werd via dit buisje met dezelfde pompopstelling verbonden die schematisch in fig. 9 is weergegeven. In A is het reservoir R_1, gevuld met methaan, door middel van het regelventiel K_3 met de pompopstelling verbonden. Het gedeelte van het pompsysteem dat in de figuur binnen de stippellijnen valt, werd gedurende 15 uur bij een temperatuur van 400 °C ontgast. De beeldbuis bleef daarbij op kamertemperatuur. Na deze ontgassingsperiode bedroeg de totale druk, gemeten met het omegatron, ongeveer 10^{-8} torr. Het restgas bestond nagenoeg geheel uit waterstof, stikstof en kooldioxyde. Vervolgens werd de verbinding met de beeldbuis tot stand gebracht door het bolcapillair met een stalen kogeltje te verbrijzelen. De hoogvacuümkraan K_1 werd gesloten, waarna met behulp van het regelventiel K_3 een methaandruk van ongeveer 5×10^{-6} torr in de buis werd ingesteld. Het omegatron werd zo ingesteld dat de ionen met massa 16 in resonantie waren, zodat de druk van het methaan tijdens de meting voortdurend kon worden bepaald. Tijdens de meting schreef de elektronenbundel op het fluorescerende scherm een raster, waarbij de beschreven schermoppervlakte gevarieerd kon worden. *Fig. 15* geeft het verloop van de methaandruk, logaritmisch uitgezet vanaf het moment van inschakelen, als functie van de tijd, voor vijf verschillende beschreven schermoppervlakten. De stroomdichtheid van de elektronenbundel aan het scherm bedroeg steeds 1 μA/cm², de versnellende spanning 16 kV. Het resultaat is onafhankelijk van het feit of de bariumgetter verdampt wordt of niet.

Metingen zoals die waarvan de resultaten in fig. 15 zijn uitgezet, zijn uitgevoerd voor verschillende stroomdichtheden aan het scherm. Zij geven alle soortgelijke resultaten als in fig. 15, met dien verstande dat de druk sneller afneemt naarmate de stroomdichtheid groter is.

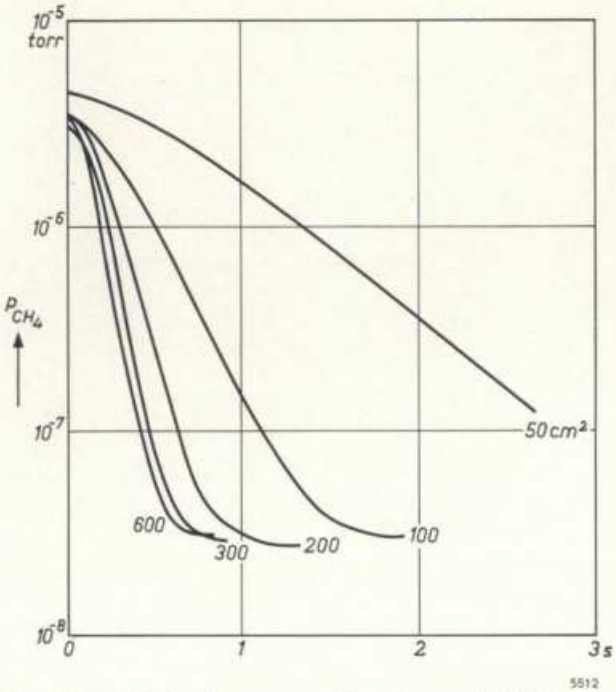


Fig. 15. Het drukverloop van methaan in een beeldbuis. De druk is logaritmisch uitgezet als functie van de tijd in seconden, voor vijf grootten van het beschreven rasteroppervlak, bij een constante stroomdichtheid van de elektronenbundel ($j = 1$ μA/cm² op het scherm). $V_a = 16$ kV.

Het karakteristieke verloop van de krommen in fig. 15 is op de volgende wijze kwalitatief te begrijpen. Stel, de elektronen maken, als zij het scherm bombarderen, in de silicaatbinder van de fluorescerende laag actieve centra, waardoor er op vallende methaanmoleculen gebonden worden, terwijl tegelijkertijd waterstof gedesorbeerd wordt. In het begin neemt tijdens het schermbombardement het aantal centra toe en daarmee ook de pompsnelheid. Neemt men aan dat na enige tijd het aantal centra een maximale, constante waarde bereikt, dan is in te zien dat de pompsnelheid dan constant moet worden. Dit is het geval in het rechte stuk van de kromme in fig. 15. Na geruime tijd wordt een evenwichtstoestand bereikt, waarbij de druk constant blijft. In deze toestand wordt evenveel methaan opgenomen als er vrijkomt.

Wat verder uitgebreid, kan men de volgende beschrijving geven. Stel, n_0 is het maximale aantal te vormen centra per cm² en er zijn op het gebombardeerde schermoppervlak (rasteroppervlakte A) reeds N centra gemaakt, dan is het aantal centra dat nog kan worden gemaakt $An_0 - N$. De snelheid waarmee het aantal nog te vormen centra verandert, blijkt uit de experimenten evenredig te zijn met de stroomdichtheid j aan het scherm. Tevens is gebleken dat de actieve centra een zekere levensduur hebben en dat het aantal hiervan dat per tijdseenheid verdwijnt, evenredig is met het aantal dat

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aanwezig is. Het aantal centra dat verdwijnt ten gevolge van methaanadsorptie is verwaarloosbaar klein. Voor het aantal centra dat per tijdseenheid ontstaat of verdwijnt, geldt derhalve:

$$\frac{dN}{dt} = k_1 j (An_0 - N) - k_2 N. \quad . . . . \quad (11)$$

k_1 en k_2 zijn constanten. Indien er evenwicht bereikt is, geldt:

$$\frac{dN}{dt} = 0. \quad . . . . . \quad (12)$$

Dan is dus, als we nog $k_1/k_2 = k$ stellen:

$$N = \frac{k_1 j A n_0}{k_1 j + k_2} = \frac{kj A n_0}{kj+1}. \quad . . . . . \quad (13)$$

Het aantal moleculen methaan dat per tijdseenheid door het scherm wordt opgenomen, d.i. $V\,dp/dt$, is evenredig met het aantal actieve centra en met de druk:

$$V\frac{dp}{dt} = -\alpha N p. \quad . . . . . \quad (14)$$

Door combinatie met verg. (9) volgt hieruit dat de pompsnelheid $S = +\alpha N$, waarin α een evenredigheidsfactor is, of als we de maximale pompsnelheid per cm² αn_0 met s_0 aanduiden:

$$S = \frac{kj A s_0}{kj + 1}. \quad . . . . . \quad (15)$$

In het rechte deel van de „karakteristiek" van fig. 15 is de pompsnelheid constant en het aantal te vormen centra onder de gegeven voorwaarden maximaal. De maximale pompsnelheid per cm² is $s_0 = 0{,}01$ l/s, en de constante $k = 2{,}0$. De gevonden formule geeft een goede overeenstemming met de experimenteel gevonden waarden van de pompsnelheid voor verschillende waarden van de rasteroppervlakte A en de stroomdichtheid j aan het scherm. Tot een rasteroppervlakte van 300 cm² geldt deze formule, daarboven neemt de pompsnelheid minder snel toe dan de formule aangeeft.

De grote pompsnelheid voor methaan in de beeldbuis tijdens gebruik verlaagt de methaandruk aanzienlijk. In een complete beeldbuis die niet in gebruik is, is de methaandruk vaak het hoogst van alle aanwezige soorten gas. Dit is een gevolg van het feit dat reeds bij kamertemperatuur methaan kan ontstaan door reacties tussen waterdamp en koolstof uit de getterspiegel. De bariumgetter zelf neemt het methaan niet op. Indien het methaan tijdens gebruik niet zou verdwijnen, zou het ionenbombardement van de katode zeer veel sterker zijn en daardoor de levensduur van de buis worden bekort. Dit feit illustreert duidelijk hoe belangrijk het is de samenstelling van het restgas te kennen en de verschillende processen die zich in een televisiebeeldbuis kunnen voordoen te onderzoeken.

Samenvatting. Voor de vervaardiging van televisiebeeldbuizen is het van belang niet alleen de totale druk, maar ook de kwantitatieve samenstelling van het aanwezige restgas te onderzoeken. Met behulp van het omegatron kan men dit doel zeer goed verwezenlijken. Na een korte inleiding over het principe van het omegatron voor kwantitatieve analyse en over de meetopstelling wordt de gasafgifte van verschillende onderdelen van de beeldbuis besproken. Vervolgens wordt een methode beschreven om de gassamenstelling in afgekeurde buizen uit de fabricage te onderzoeken. Enige resultaten worden gegeven. Ten slotte worden metingen van de zeer grote pompsnelheid voor methaan van een fluorescerend scherm in een beeldbuis tijdens elektronenbombardement besproken. Dit „wegpompen" van vrijgekomen methaan vindt tijdens de normale werking van de beeldbuis voortdurend plaats. Het is te danken aan de in het scherm gebruikte silicaatbinder, en het is van groot belang om een lange levensduur van de katode te verzekeren.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

2850: L. F. Defize en P. C. van der Willigen: Droplet transfer during arc welding in various shielding gases (Brit. Welding J. **7**, 297-305, 1960, no. 5).

Bespreking van waarnemingen aan lasbogen tussen een stalen werkstuk en een onbedekte stalen afsmeltende laselektrode die omgeven is met een beschermende gasatmosfeer (CO_2 of Ar). De verschijnselen van druppelvorming zijn bestudeerd met behulp van een vertraagde film (3000 beelden per sec). In Co_2, met de laselectrode aan de positieve pool, smelt de elektrode scheef af en worden de druppels zijdelings afgestoten, in de richting van de lasrups. Dit wordt toegeschreven aan asymmetrische verwarming van de elektrode door straling van de rups. De sterke contractie van het plasma veroorzaakt het ontstaan van dikke druppels, die voor de praktijk van het lassen ongewenst zijn. Deze contractie hangt vermoedelijk samen met grote warmtegeleiding van CO_2 bij de boogtemperatuur. In argon is de contractie van het plasma kleiner en treedt bij grote stromen geen asymmetrische druppelvorming op. Door het vrij grote anodische aanrakingsoppervlak krijgt men kleine druppels, die axiaal door de boog gaan. Met de laselektrode aan de negatieve pool treden dikke druppels op. Dit wordt toegeschreven aan de kleine diameter van de katodevlek. Toevoegen van stoffen die de thermische emissie van de laselektrode en daarmee de katodevlek vergroten, doet bij Ar de verschijnselen naderen tot die bij positieve laselektrode. In CO_2 gelukt het niet op die wijze de vorming van dikke druppels te voorkomen.

2851: M. Avinor en G. Meijer: Vanadium-activated zinc and cadmium sulphide and selenide phosphors (Phys. Chem. Solids **12**, 211-215, 1960, no. 3/4).

Het was bekend dat vanadium (V) de zichtbare fluorescentie die Cu en Ag in CdS en verwante fosforen veroorzaken, dooft. Het blijkt nu dat deze doving niet bestaat in vernietiging zonder meer van de zichtbare fluorescentie, maar dat ze gepaard gaat met het optreden van een nieuwe emissieband in het infrarood in de buurt van 2,0 μ. V alléén geeft ook deze emissie, maar in de meeste gevallen wordt zij door Cu en Ag versterkt. Men kan zeggen dat monovalent Cu en Ag hier optreden als coactivatoren van het trivalente V. Onderzocht zijn CdS, ZnS, CdSe en ZnSe, met als toevoeging V, V-Ag, V-Cu en V-Au. De spectrale verdeling der emissiebanden, bij excitatie met een hogedrukkwiklamp, is met een monochromator en een thermozuil gemeten bij 300 °K en 80 °K.

2852: G. Diemer: Power amplifiers using electro-optical effects (Electronics **33**, no. 9, 71-73, 1960).

Kort overzicht van 27 mogelijkheden voor de constructie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van vermogensversterkers waarbij van elektro-optische verschijnselen gebruik wordt gemaakt (zie ook deze publikaties nos. **2784** en **R 401**).

2853: H. Zijlstra: On magnetic annealing of a permanent magnet alloy (dissertatie Amsterdam, 1 juni 1960).

In dit proefschrift wordt verslag gedaan van een onderzoek naar de oorzaken van de magnetische anisotropie die het materiaal „Ticonal G" krijgt door warmtebehandeling in een magnetisch veld. De hardmagnetische eigenschappen van dit materiaal worden veroorzaakt door het voorkomen van twee fazen, die fijn gedispergeerd zijn als langgerekte deeltjes. De richting dezer deeltjes kan worden beïnvloed door een magneetveld tijdens de warmtebehandeling die nodig is om het oorspronkelijk homogene materiaal in de tweefazige toestand te brengen. Uit metingen van de verzadigingsmagnetisatie blijkt dat de splitsing in twee fazen snel verloopt. Metingen van de magnetische anisotropie en van de gemiddelde afstand der geprecipiteerde deeltjes tonen aan dat veranderingen hiervan meer tijd kosten, zodat ze moeten worden toegeschreven aan veranderingen van vorm en grootte der deeltjes, met behoud van de totale hoeveelheid en van de chemische samenstelling van iedere faze. Voor dit laatste proces wordt een diffusievergelijking opgesteld, die, toegepast op een model van langgerekte ovoïden, het experimentele gedrag behoorlijk weergeeft. Oppervlakdiffusie langs de grensvlakken blijkt onverenigbaar te zijn met het experiment. Uit de experimenten kan, door vergelijking met de zoëven genoemde theorie, een waarde voor de grensvlakenergie worden afgeleid. Deze is slechts ca. 1 erg/cm². In overeenstemming met dezelfde theorie wordt experimenteel bevestigd dat ook de zg. legering van Mishima anisotroop wordt door gloeien in een magneetveld. De discussie wordt voorafgegaan door een beschrijving van de gebruikte meetmethodes en opstellingen.

2854: J. van der Ster: The production of liquid nitrogen from atmospheric air using a gas refrigerating machine (dissertatie Delft, 22 juni 1960).

De ontwikkeling van de koudgaskoelmachine heeft het mogelijk gemaakt op economische wijze kleine hoeveelheden vloeibare lucht te maken. In dit proefschrift wordt beschreven hoe als volgende stap vloeibare stikstof uit lucht kan worden gewonnen door deze koelmachine te combineren met een luchtsplitsingskolom (zie Philips techn. T. **20,** 196-206, 1958). In het bijzonder worden ontwerp en bouw van een installatie beschreven waarmee ruim 4 liter vloeibare stikstof per uur kan worden gemaakt. De zuiverheid van het produkt is 99,8-99,9%, het energieverbruik is 1,36 kWh/l. Het meest kenmerkende verschil met bestaande luchtsplitsingsinstallaties is dat de te verwerken lucht niet wordt gecomprimeerd. Hierdoor is het mogelijk gebleken om een, ook wat de regeling betreft, zeer eenvoudige installatie te maken. Door afkoeling van de lucht worden waterdamp en koolzuur eruit verwijderd. Dit gebeurt op een zodanige manier dat het mogelijk is de installatie, ondanks de compacte bouw, een week ononderbroken te laten werken. De installatie is voorzien van een automatische refluxregeling, die uitvoerig wordt behandeld. In deze refluxregeling is een dampbellenpomp toegepast, waarmee vloeibare stikstof wordt opgepompt. Er wordt een onderzoek beschreven dat gedaan is aan dampbellenpompen voor vloeibare stikstof en vloeibare zuurstof. Om de zuiverheid van het produkt, de vloeibare stikstof, op een eenvoudige wijze te kunnen meten, is een areometer ontwikkeld. Berekeningen en metingen aan deze areometer zijn eveneens opgenomen.

Er zijn maatregelen genomen tegen het gevaar van explosie van koolwaterstoffen, die zich in de installatie kunnen verzamelen; metingen die hierop betrekking hebben, worden beschreven.

2855: G. Meijer en R. van der Veen: Dual effect of nightbreak light (Acta bot. neerl. **9,** 220-223, 1960, no. 2).

Planten van Salvia occidentalis, van nature een kortedagplant, werden per etmaal bestraald met 8 of 10 uren blauw licht, al of niet gevolgd door 4 uren rood of blauw licht. Bovendien werd de donkere periode al of niet onderbroken door een kortstondige extrabestraling (b.v. 15 min) met rood licht. Doorgaans doet deze extrabestraling een langedageffect ontstaan (uitblijven van bloei). In sommige gevallen echter, waarbij ten gevolge van voorafgaande bestraling (b.v. 10 uur blauw, 4 uur rood) reeds een langedageffect optrad, deed de kortstondige extrabestraling in de donkere periode het kortedageffect (optreden van bloei) terugkeren. Bij verlenging van de extrabestraling tot 30 à 60 min bleef het langedageffect bestaan. Het terugkeren van het kortedageffect door extrabestraling met rood (10 min) kon ook worden teniet gedaan door een tweede extrabestraling (10 min) met langgolvig rood of (nabij) infrarood.

2856: E. H. Reerink, H. F. L. Schöler, P. Westerhof, A. Querido, A. A. H. Kassenaar, E. Diczfalusy en K. C. Tillinger: A new class of hormonally active steroids (Nature **186,** 168-169, 1960, no. 4719).

Voorlopige mededeling over dierproeven en klinische experimenten met nieuwe synthetische produkten die verwant zijn met natuurlijke steroïdehormonen, maar die daarvan afwijken door een andere configuratie van de asymmetriecentra 9 en 10. Sommige der onderzochte verbindingen vertoonden een opmerkelijk grote activiteit, vergeleken met bekende hormonen, en bovendien interessante klinische effecten. Een uitvoerige publikatie volgt elders.

2857: J. Verweel en B. J. M. Roovers: Magnetic properties and conduction phenomena in pure and substituted yttrium iron garnets (Solid state physics in electronics and telecommunications, Proc. int. Conf., Brussel, 2-7 juni 1958, red. M. Désirant en J. L. Michiels, deel 3, blz. 475-487, Academic Press, Londen 1960).

In de stof $Y_3Fe_5O_{12}$, die een granaatstructuur heeft, kunnen substituties worden uitgevoerd. Een kleine hoeveelheid δ der Y^{3+}-ionen kan worden vervangen door Ca^{2+}, waardoor tevens een deel δ der Fe^{3+}-ionen overgaat in Fe^{4+}. Anderzijds kunnen δ Fe^{3+}-ionen worden vervangen door Ti^{4+} of Si^{4+}, waardoor δ andere Fe^{3+}-ionen worden gereduceerd tot Fe^{2+}. Diverse preparaten van deze soort zijn onderzocht op fysische eigenschappen, zoals soortelijke weerstand, de activeringsenergie van de soortelijke weerstand, en de thermokracht, alle als functie van δ. Verder de beginpermeabiliteit (complex) als functie van frequentie en temperatuur.

2858: J. Smit, F. K. Lotgering en U. Enz: Anisotropy properties of hexagonal ferrimagnetic oxides (J. appl. Phys. **31,** suppl. bij no. 5, 137S-141S, 1960).

In hexagonale kristallen van het type ferroxdure is de *c*-as voorkeursrichting voor de magnetisatie. Er is een magnetisch veld nodig om de magnetisatie van richting te doen veranderen. In dat geval werkt er een koppel op het kristal. Dit koppel is gemeten als functie van de oriëntatie van het kristal ten opzichte van het veld. Het betrof polykristallijn materiaal met samenstelling $BaCo_xTi_xFe_{12-2x}O_{19}$, met gerichte kristallieten. In de verkregen koppelkrommen treden anomalieën op, die met de bijzonder sterke anisotropie van de kobaltionen verklaard kunnen worden.

2859: M. Koedam en A. Hoogendoorn: Sputtering of copper single crystals bombarded with A^+, Kr^+ and Ne^+ ions with energies ranging from 300-2000 eV (Physica **26,** 351-352, 1960, no. 5).

Eerder meegedeelde onderzoekingen over verstuiving van monokristallijne metaaloppervlakken door ionenbombardement worden uitgebreid tot grotere ionenenergieën (zie ook deze publikaties nos. **2767** en **2840**).

2860: M. P. Rappoldt: Investigations on sterols, XIV. Studies on vitamin D and related compounds, XII. The photo-isomerization of lumisterol$_2$ (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **79,** 392-400, 1960, no. 5).

Metingen betreffende de snelheid van de foto-isomerisatie van lumisterol$_2$ door bestraling met ultraviolet van diverse golflengten. Het blijkt dat noch tachysterol$_2$, noch ergosterol als primair reactieprodukt optreedt. Lumisterol$_2$ wordt uitsluitend omgezet in pre-ergocalciferol. Het quantumrendement van deze reactie bedraagt 0,41 bij bestraling met ultraviolet van 2537 Å golflengte.

2861: M. P. Rappoldt en E. Havinga: Investigations on sterols, XIII. Studies on vitamin D and related compounds, XI. The photo-isomerization of ergosterol (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **79,** 369-381, 1960, no. 5).

Metingen betreffende de snelheid van de foto-isomerisatie van ergosterol door bestraling met diverse lichtbronnen. Hiertoe moesten nieuwe bepalingsmethodes worden gevonden voor pre-ergocalciferol en tachysterol$_2$. Bij bestraling met 2537 Å

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bij 20 °C is het quantumrendement 0,31. Dit geldt voor oplossingen in ether, ethanol en petroleumether. Tachysterol$_2$ wordt niet gevormd uit ergosterol gedurende bestraling, maar uitsluitend uit pre-ergocalciferol. Een aangeslagen ergosterolmolecuul heeft 69% kans terug te keren naar de grondtoestand, 26% kans over te gaan in pre-ergocalciferol en 5% kans andere (niet geïdentificeerde) produkten te vormen.

2862: M. Avinor en G. Meijer: Emission of activated cadmium selenide phosphors (J. chem. Phys. **32,** 1456-1458, 1960, no. 5).

Metingen aan fluorescentiespectra van CdSe, geactiveerd met Cu, Au en Ag. De fosforen werden geëxciteerd met een hogedrukkwiklamp met $CuSO_4$-filter. Ter vergelijking werden tevens metingen verricht aan de emissiespectra van CdS met dezelfde activatoren en coactivatoren. De emissiebanden van CdSe zijn ten opzichte van die van CdS naar het infrarood verschoven. Bij CdSe met Ag als activator zijn alleen metingen verricht bij lage temperatuur (80 °K), daar de fluorescentie bij kamertemperatuur gedoofd is. Een nieuwe band, zoals bij CdS verschijnt als de activator in overmaat aanwezig is, is bij CdSe niet waargenomen. Behalve de activatorbanden (Ag 0,92 μ, Cu 1,20 μ, Au 1,45 μ, bij 80 °K) is bij CdSe een emissie gevonden nabij de absorptiegrens (0,72 μ).

2863: A. A. Aldenkamp, C. P. Marks en H. Zijlstra: Frictionless recording torque magnetometer (Rev. sci. Instr. **31,** 544-546, 1960, no. 5).

Beschrijving van een apparaat waarmee snel de magnetische anisotropie van een groot aantal monsters kan worden onderzocht. Het voornaamste deel bestaat uit twee schijfjes boven elkaar, die door drie aan de omtrek opgestelde, platte veren elastisch verbonden zijn. Het bovenste schijfje wordt, via een wormwiel, door een synchrone motor eenparig rondgedraaid. Het onderste draagt aan een stift het preparaat, dat zich in een permanent magneetveld bevindt. Door de anisotropie ontstaat een torsiekoppel, dat de schijfjes, tegen de werking van de veren in, een kleine hoekverdraaiing ten opzichte van elkaar geeft. Deze hoekverdraaiing is een maat voor het koppel, en wordt gemeten door de uitgangsspanning van een differentiële transformator. Eén spoel hiervan zit vast aan het onderste schijfje, terwijl de beide andere aan het bovenste schijfje vastzitten. De uitslag wordt door een penschrijver geregistreerd. De gevoeligheid bedraagt $1{,}5\times10^{-5}$ Nm (= 150 dynecm) per cm van de schaal.

2864: F. J. Schijff: Safety and reliability in the instrumentation of nuclear reactors (Revue HF Tijdschrift **4,** 223-229, 1960, no. 10).

Aan instrumenten voor de automatische beveiliging van een kernreactor moet men de eis stellen van veiligheid (zij moeten in werking treden in de zeldzame gevallen waarin een ongewenste situatie optreedt) en betrouwbaarheid (zij mogen niet in werking treden als het niet nodig is). Het eerste is vereist ter bescherming van personen en goederen, het tweede is gewenst uit een oogpunt van economie. Veiligheid en betrouwbaarheid kunnen worden vergroot door gebruik te maken van coïncidentieschakelingen. Verder kan de veiligheid worden vergroot door regelmatige controle van de veiligheidskanalen en door voortdurende vergelijking van de signalen van identieke kanalen. Zie ook Philips techn. T. **19,** 289-301, 1957 en **22,** 151-155, 1959.

2865: F. N. Hooge: Relation between electronegativity and energy bandgap (Z. phys. Chemie (Frankfort a.M.) **24,** 275-282, 1960, no. 3/4).

Bij halfgeleidende verbindingen van het type AB — waarbij de waardigheden van A en B overeenkomen met hun kolom in het periodieke systeem — is het energieverschil ΔE_{AB} tussen de volle en de lege energieband in eerste benadering gelijk aan de som van een bijdrage van A en een bijdrage van B. (Als het elementen uit de vierde kolom betreft, mag A ook gelijk zijn aan B, zoals b.v. bij diamant of germanium.) Er bestaat een relatie $\Delta E_{AB} = \frac{1}{2}|10X_A - 17{,}5| + \frac{1}{2}|10X_B - 17{,}5|$, waarin ΔE_{AB} is uitgedrukt in eV en X_A en X_B de elektronegativiteiten volgens Pauling zijn van A en B, en waarbij de getalwaarden van Gordy en Thomas zijn gebruikt. Deze relatie is grafisch getoetst. Als $X \approx 1{,}75$ (dan geldt $\Delta E_{AB} \approx 0$), wordt de uit de formule berekende waarde van ΔE_{AB} erg onnauwkeurig. De formule zou in zulke gevallen gebruikt kunnen worden om met behulp van experimenteel bepaalde waarden van ΔE_{AB}, waarden van X af te leiden. Het is echter de vraag of zulke waarden van de elektronegativiteiten betekenis hebben bij andere problemen dan de hier behandelde.

Van de genoemde relatie kan, aan de hand van een vereenvoudigd model, een quantummechanische interpretatie gegeven worden.

2866: G. Thirup: The application of phase-locking techniques to the design of apparatus for measuring complex transfer functions (J. Brit. Instn. Radio Engrs. **20,** 387-396, 1960, no. 5).

De theorie van fazesynchronisatie wordt in het kort gegeven. Twee hierop berustende apparaten voor het meten van complexe spanningsverhoudingen worden beschreven. In het eerste, dat een frequentiegebied heeft van 1 tot 110 MHz, wordt de te meten spanningsverhouding getransformeerd naar een constante middenfrequentie van 450 kHz. Het frequentieverschil tussen signaalgenerator en lokale oscillator wordt constant gehouden met behulp van mechanische koppeling van de afstemcondensatoren en elektronische fazesynchronisatie; beschreven worden speciale middelen om het „vanggebied" uit te breiden, waarbij gebruik gemaakt wordt van een grove en een fijne elektronische instelling. In het tweede apparaat, dat een frequentiegebied 30-700 MHz heeft, wordt een dubbele frequentietransformatie toegepast. De eerste lokale oscillator en de signaalgenerator zijn vrijlopend en worden met de hand afgestemd. De frequentie van een tweede lokale oscillator wordt door middel van fazesynchronisatie 450 kHz beneden het frequentieverschil van signaalgenerator en eerste lokale oscillator gehouden. Ten slotte wordt beschreven hoe de complexe spanningsverhouding op een katodestraalbuis kan worden weergegeven.

2867: M. Avinor: Gold-activated Zn,CdS phosphors (J. Electrochem. Soc. **107,** 608-611, 1960, no. 7).

De emissiespectra van met Au geactiveerde (Zn,Cd)S-fosforen, gedeeltelijk met Al als coactivator, zijn onderzocht. Het Cd-gehalte varieerde van 100% tot 0%. In CdS zijn banden gevonden bij 640, 800 en 1150 nm. De laatste band verschijnt alleen als er een coactivator aanwezig is; hij correspondeert met de 530-nm-band in ZnS. Op grond van de overeenkomst met door Cu en Ag geactiveerd (Zn,Cd)S mag worden aangenomen dat Au in dezelfde toestand aanwezig kan zijn als Cu en Ag. Ten opzichte van Cl als coactivator is er een verschil tussen Au enerzijds en Cu en Ag anderzijds. De kortgolvige banden van Au verschillen in karakter van de overeenkomstige banden van Cu en Ag.

2868: H. Bremmer: The propagation over an inhomogeneous earth considered as a two-dimensional scattering problem (Electro-magnetic wave propagation, verslag int. conf., georganiseerd door de PTT-groep van de Expo Brussel 1958, onder redactie van M. Désirant en J. L. Michiels, blz. 253-260, Academic Press, Londen 1960).

Het artikel handelt over een tweedimensionele integraalvergelijking voor de verdeling van de veldsterkte van een zender over een vlakke inhomogene aarde. De vergelijking wordt verkregen door een randvoorwaarde in te voeren, die bij benadering rekenschap geeft van de lokale verdeling van de elektrische constanten ε en σ. De oplossing kan worden gegeven in de vorm van een oneindige reeks, die wordt geïnterpreteerd als een som van verstrooiingseffecten. Het resultaat wordt in een bijzonder geval (twee homogene gebieden met een rechte scheidingslijn) vergeleken met dat, afgeleid uit de conventionele eendimensionele vergelijking, die te beschouwen is als een zadelpunt-benadering van de genoemde tweedimensionele vergelijking.

2869: C. Z. van Doorn en Y. Haven: Anisotrope kleurcentra in KCl (Ned. T. Natuurk. **26,** 216-220, 1960, no. 7).

Wanneer een KCl-kristal door verhitting in K-damp gekleurd wordt (F-absorptieband bij 5340 Å) en daarna bij kamertemperatuur bestraald wordt met licht van een golflengte uit de absorptieband, ontstaat een nieuwe absorptieband (M-band, 8080 Å). Na bestraling bij 80 °K met gepolariseerd licht van een golflengte uit de F-band blijkt zowel de F- als de M-absorptie gepolariseerd te zijn. De schrijvers interpreteren dit verschijnsel door aan te nemen dat de M-band wordt veroorzaakt door twee naburige Cl-vacatures. De verdiensten van dit model worden afgewogen tegen die van soortgelijke modellen (van Seitz en van Knox).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!